

Opinnäytetyö

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri AMK

Rakennesuunnittelu

2020

Johanna Haapanen

ELEMENTTIRAKENTEISEN  
RAKENNUKSEN  
KOKONAISJÄYKISTYKSEN  
TARKASTELU ROBOT  
STRUCTURAL ANALYSIS  
PROFESSIONAL  
2019 -OHJELMALLA

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus, insinööri (AMK)

2020 | 40 sivua, 28 liitesivua

Johanna Haapanen

# ELEMENTTIRAKENTEISEN RAKENNUKSEN KOKONAISJÄYKISTYKSEN TARKASTELU ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL 2019 -OHJELMALLA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019 -ohjelman käyttöä rakennuksen kokonaisjäykistykseen tarkastelussa.

Työssä perehdyttiin elementtirakenteisen rakennuksen kokonaisjäykistykseen periaatteisiin, tuuli- ja lisävaakavoimien laskemiseen sekä vaakavoimien jakautumiseen jäykistäville seinille. Esimerkit mallinnettiin Robot -ohjelmaan.

Vaakavoimat jakautuvat jäykistäville seinille niiden jäykkyyksien suhteessa. Jäykistävät seinät pyritään sijoittamaan rakennukseen mahdollisimman symmetrisesti, jotta rakenteisiin ei aiheudu kiertymistä. Esimerkkien avulla verrattiin käsinlaskennan tuloksia FEM-laskennan tuloksiin. Vaakavoimien jakautumisessa seinille oli eroja. Vertailu tehtiin myös pystykuormista eikä näissä eroja ollut.

## ASIASANAT:

jäykistäminen, Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019, tuulikuorma, kiertokeskiö

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree programme in Construction and Municipal Engineering, BEng

2020 | number of pages 40, number of pages in appendices 28

Johanna Haapanen

# REVIEW OF THE TOTAL STIFFENING OF A PREFABRICATED BUILDING WITH ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL 2019 PROGRAM

The purpose of the theses was discuss about the usage of Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019 program when reviewing the total stiffening of a building.

The theses focused on the principles of the total stiffening of a prefabricated structure, calculating wind forces and additional horizontal forces along with the distripution of horizontal forces on stiffening walls. The examples were simulated with Robot -program.

The horizontal forces distribute on stiffening walls in terms of their stiffnesses. The stiffening walls are intended to be placed in the building as symmetrically as possible so that there wouldn't be a rotation in the structures. The hand-calculated result was compared to the FEM calculating results with the help of the examples. There were some differences between the distripution of the horizontal forces on the walls. A comparison was also made of vertical forces and there were no differences between those.

## KEYWORDS:

stiffening, Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019, wind load, centre of rigidity

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 JÄYKISTYKSEN SUUNNITTELU</b>	<b>8</b>
2.1 Periaatteet	8
2.2 Elementtirungon jäykistysjärjestelmät	8
2.3 Jäykistysosien sijoitus	10
2.4 Elementtien liitokset	10
2.5 Rakenneosien mitoitus	12
2.5.1 Kuormitusyhdistelmät	13
2.5.2 Tuulikuorma	15
2.5.3 Lisävaakavoimat	19
2.5.4 Kokonaisvaakavoiman jakautuminen jäykistäville seinille	20
<b>3 FEM-MALLINNUS</b>	<b>23</b>
3.1 Yleistä FEM-mallinnuksesta	23
3.2 Rakenneosien mallinnus	23
3.3 Tulosten vertailut	26
3.4 Pystykuormat	33
3.5 Palvelutalo Hirvensalmi	34
<b>4 LOPUKSI</b>	<b>39</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>40</b>

## LIITTEET

Liite 1. Esimerkki 1. Mallit 1–4, vaakavoimien jakautuminen jäykistäville seinille.  
Liite 2. Esimerkki 2. Malli 5, vaakavoimien jakautuminen jäykistäville seinille.  
Liite 3. Esimerkki 3. Malli 7, vaakavoimien jakautuminen jäykistäville seinille.  
Liite 4. Pystykuormat.  
Liite 5. Pohjapiirustus 1. krs.  
Liite 6. Pohjapiirustus 2. krs.  
Liite 7. Jäykistävien seinien sijainti.  
Liite 8. Jäykistävien seinien mitat.  
Liite 9. Laskelmat.

## KAAVAT

Kaava 1. Staattinen tasapaino, EQU/sarja A.	13
Kaava 2. Matalan rakennuksen tuulikuorma voimakerroinmenetelmällä.	16
Kaava 3. Korkean rakennuksen tuulikuorma voimakerroinmenetelmällä.	16
Kaava 4. Lisävaakavoimat.	19
Kaava 5. Seinän jäykkyys.	20
Kaava 6. Jäyhyysmomentti.	20
Kaava 7. Jäykistävän seinän kuorma vaakavoimista.	21
Kaava 8. Kiertokeskiö.	21
Kaava 9. Rakennetta kuormittava momentti.	21
Kaava 10. Jäykistävien seinien jäykkyyspainopisteet.	21
Kaava 11. Siirtymä x- ja y-suuntaan.	22
Kaava 12. Kiertymä.	22
Kaava 13. Jäykistävien seinien kuorma vaakavoimista.	22

## KUVAT

Kuva 1. Monikerroksinen pilari-palkkirunko.	9
Kuva 2. Levyrunko.	9
Kuva 3. Elementtien pystysauman liitos.	11
Kuva 4. Jäykistävän seinäelementin liitos ontelolaattavälipohjaan.	12
Kuva 5. Rakennekerroin $c_s c_d$ .	17
Kuva 6. Moduuliverkko.	24
Kuva 7. Core wall.	25
Kuva 8. Laatan mallinnus.	26
Kuva 9. Malli 1, seinien sijainti.	27
Kuva 10. Vaakavoiman siirtyminen jäykistäville seinille.	28
Kuva 11. Laatasta kiertävä momentti.	29
Kuva 12. Jäykistävien seinien sijainti.	30
Kuva 13. X-akselin suuntaisen vaakakuorman jakautuminen seinille.	31
Kuva 14. Y-suuntaisen vaakakuorman jakautuminen seinille.	32
Kuva 15. KV101 vaakakuormat.	36
Kuva 16. KV101 pystykuormat.	37
Kuva 17. Geometrinen painopiste.	37

## TAULUKOT

Taulukko 1. Kuormakerroin.	13
Taulukko 2. Yhdistelykertoimien arvot.	14
Taulukko 3. Rakennusten hyötykuormat.	15
Taulukko 4. Tehollinen hoikkuus $\lambda$ .	17
Taulukko 5. Voimakerroin cf.	18
Taulukko 6. Puuskanopeuspaineen ominaisarvo $q_{p0}(z)$ tasaisessa maastossa.	19
Taulukko 7. Tulosten vertailu, mallit 1-4.	27

Taulukko 8. Mallin 5 tulokset.	29
Taulukko 9. Mallin 7 vertailut.	33
Taulukko 10. Pystykuormien vertailu.	34
Taulukko 11. Palvelutalo Hirvensalmen tulokset.	35

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia elementtirakenteisen rakennuksen kokonaisjäykistyksen laskentaa Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019 -ohjelmalla.

Opinnäytetyö on tehty Potius Oy:lle. Kokonaisjäykistyksen laskeminen käsin on työlästä ja tavoitteena on saada Robot-ohjelmasta työkalu, jonka avulla saadaan määritettyä jäykistäville betoniseinille tulevat kuormitukset ja tuloksien perusteella saadaan määritettyä vaadittavat tartunnat ja raudoitukset yksittäisille seinille.

Opinnäytetyössä tarkastellaan ensin jäykistämiseen liittyvää teoriaa ja laskentakaavoja. Tämän jälkeen tutkitaan mallin luomista Robotiin ja vertaillaan Excel-taulukon tuloksia Robotin antamiin tuloksiin ja tutkitaan tuloksien luotettavuutta.

## 2 JÄYKISTYKSEN SUUNNITTELU

### 2.1 Periaatteet

Elementtirakenteiden suunnittelussa on kiinnitettävä erityisesti huomiota rakennuksen jäykistämiseen ja elementtien välisiin liitoksiin. Rakennuksen jäykistyksen tehtävä on siirtää tasojen vaakarakenteilta vaakakuormien aiheuttamat rasitukset pystyrakenteiden kautta maapohjaan. (Elementtisuunnittelu 2010a; Leskelä 2008, 519.)

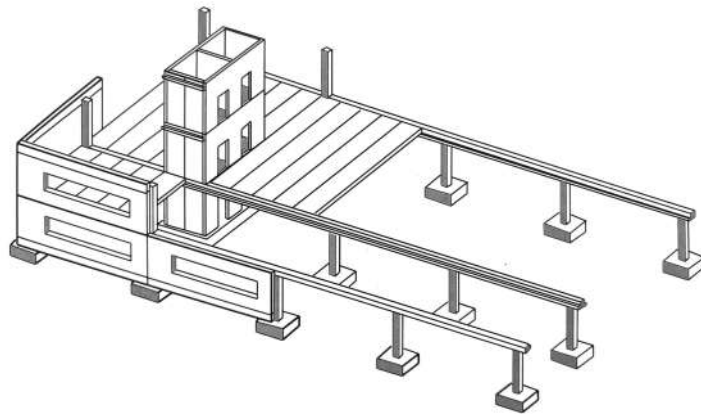
Rakennuksen rungon on kuormankantokyvyn lisäksi oltava riittävän stabiili, jolloin runkoon vaikuttavat voimat ovat tasapainossa eikä rakenne kaadu. Tämän lisäksi rungon muodonmuutoksen on pysyttävä sallituissa rajoissa sekä rungolla on oltava riittävä varmuus kaatumista ja liukumista vastaan. Osien rakennusaikainen stabiiliisuus on suunniteltava erikseen, koska rakenteen jäykkyys on yleensä riittävä vasta silloin, kun osien väliset liitokset ovat valmiit. Elementtien kuormitus on mahdollista vasta, kun liitoksilla on riittävä kestävyys ottaa vastaan niihin kohdistuvat rasitukset. (Leskelä 2008, 526.)

### 2.2 Elementtirungon jäykistysjärjestelmät

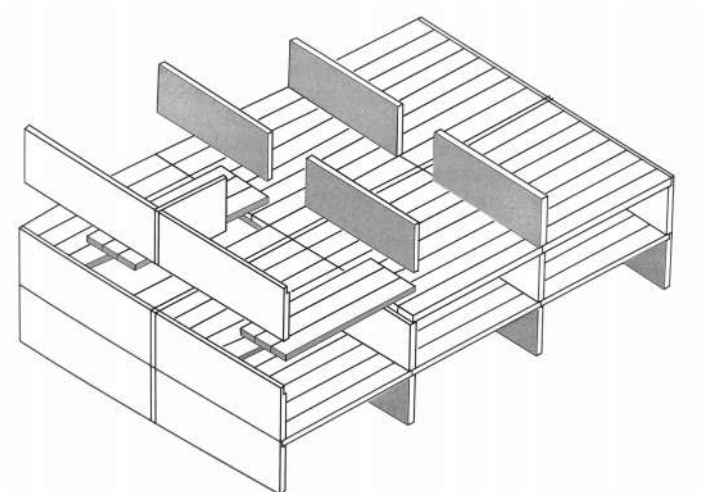
Jokaiselle rakennukselle valitaan sopivin jäykistysjärjestelmä ja valintaan vaikuttavat muun muassa rakennuksen mittasuhteet, valittu rakennejärjestelmät, kustannukset ja mahdolliset vaatimukset rakennuksen arkkitehtuurille ja muunneltavuudelle (Elementtisuunnittelu 2010a).

Yleisimmät peruselementeistä muodostuvat rakennejärjestelmät ovat pilari-palkkirunko (kuva 1) ja levyrunko kantavilla seinillä (kuva 2). Rungon jäykistämisessä käytetään pääasiassa mastopilareita, jäykistekuiluja- ja -ristikoita. Jäykistämisosina toimivat myös ylä- ja välipohjat. (Leskelä 2008, 520.)





Kuva 1. Monikerroksinen pilari-palkkirunko (Leskelä 2008, 521).



Kuva 2. Levyrunko (Leskelä 2008, 521).

Elementtirakenteisissa asuinrakennuksissa kantavat ulkoseinät muodostavat levyjäykistyksen ja rakenne toimii vastaavalla tavalla kuin mastoseinäjäykistys. Seinien ja välipohjalaatastojen liitokset mitoitetaan aina jäykistysjärjestelmien kuormille. Mastoseinissä voi syntyä vetorasituksia, jotka on tarvittaessa vietävä maaperään asti. Näitä vetorasituksien muodostumista pyritään välttämään suunnittelemalla mastoseinät niin, että niille kertyy mahdollisimman paljon pystykuormia ja seinät ovat kaikissa tilanteissa puristettuja. Jäykistävät seinät on pyrittävä suunnittelemaan riittävän pitkiksi rakentamisen kannalta, mutta tämä voi aiheuttaa ongelmia, koska yksittäisiin elementteihin ja saumoihin voi kohdistua suuria voimia, jolloin raudoitusmäärät kasvavat huomattavasti. Seinille saadaan

huomattavasti enemmän jäykkyyttä, kun seiniä yhdistellään profiileiksi, esimerkiksi his-sikuiluiksi. (Elementtisuunnittelu 2010b.)

Jäykistysosina tasonsa suunnassa voivat toimia kaikki rakennuksen kantavat ulko- ja sisäseinät. Kantavat seinät eivät ota vastaan vaakakuormaa kohtisuorassa suunnassa vaan ne toimivat jäykistävinä rakenteina vain seinän tason suuntaan. Ei-kantavien seinien tulee kestää vain niihin suoraan kohdistuvat kuormat eivätkä ne toimi jäykistävinä osina. Kantavat seinät toimivat jäykistävinä levyinä ja kantavat välipohjia ja yläpuolisia elementtejä välittäen kuormat perustuksille. (Leskelä 2008, 526.)

### 2.3 Jäykistysosien sijoitus

Jäykistystä tarkasteltaessa runkojärjestelmästä tulee erottaa kaksi toisiaan vastaan kohtisuorassa olevaa pääsuuntaa. Jäykistävät seinät pyritään sijoittamaan mahdollisimman symmetrisesti, jolloin ei pääse muodostumaan suuria vääntövaikutuksia. Runkoon aiheutuu vääntöä, jos vaakavoimien resultantti ei kulje jäykistysjärjestelmän kiertokeskiön kautta. Jäykistysosiin syntyy näissä tapauksissa leikkausvoimia ja siirtymiä, joiden muodostuminen on otettava huomioon niin, ettei välipohjiin muodostu haitallisia halkeamia. (Leskelä 2008, 528.)

### 2.4 Elementtien liitokset

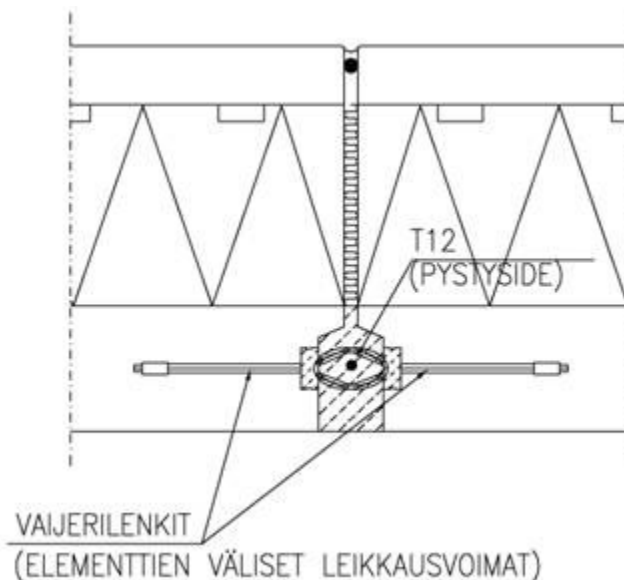
Liitoksilla kytketään elementit muihin elementteihin ja rakenteisiin, varmistetaan rakenteen toiminta esimerkiksi levyjäykisteenä tai leikkausseinänä sekä siirretään voimat niiden vaikutuskohdasta jäykistysrakenteisiin. Elementtirakentamisessa jäykistysjärjestelmä muodostuu useista osista ja liitosten suunnittelu on olennainen osa suunnittelua, jotta jäykistysjärjestelmä toimii tarkoituksen mukaisesti. Rakenteellisten tehtävien lisäksi liitoksille on vaatimuksia vesitiivyydestä, ulkonäöstä, palon- ja kulutuksenkestävyydestä. Samoin liitoksia suunniteltaessa on huomioitava elementtien valmistus, kuljetus, asennus ja toleranssit. (Leskelä 2008, 530.)

Voimat siirtyvät elementtien päissä metalliosien ja saumavalujen kautta. Liitokseen kuuluvat erilliset liituskappaleet ja teräsosat, liittymäpinnat ja elementtien päät sekä saumavalut yksityiskohtineen. (Leskelä 2008, 530.)

Tasaisten puristavien voimien siirtyminen varmistetaan pilareissa jälkivaluilla ja juotoksilla. Seinien ja laattojen tukipinnoissa voiman välittyminen varmistetaan laastitasauksella. Voimien välittymisessä käytetään myös neopreenilevyjä ja kiertymättömillä tuilla voimat voidaan välittää teräslevyjien avulla. (Leskelä 2008, 530–531.)

Vetovoimat siirretään elementtien välissä erilaisilla teräsliittimillä, jotka liitetään toisiinsa työmaalla pulttaamalla, limittämällä tai hitsaamalla. Liittimen lujuus, ankkurointikestävyys ja poikkileikkaus muodostavat liitoksen vetokestävyuden. (Leskinen 2008, 532.)

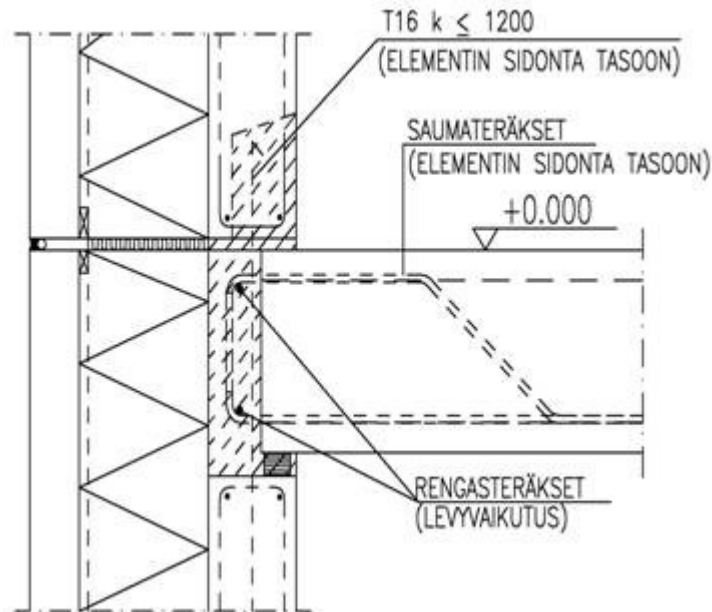
Elementtien väliset leikkausvoimat siirretään tartunnan, kitkan, saumaraudoituksen, mekaanisen liittimen tai liitoksen vaarnauksen avulla. Kuvassa 3 on yleisesti käytetty elementtien pystysauman liitos, jossa elementit yhdistetään toisiinsa vaijerilenkein varustetuilla betonivaarnasaumoilla. (Elementtisuunnittelu 2010b; Leskinen 200, 533).



Kuva 3. Elementtien pystysauman liitos (Elementtisuunnittelu 2010b).

Elementtirakenteinen väli- ja yläpohjalaatasto saumataan ja päät sidotaan raudoituksella, jolloin elementit toimivat yhtenäisenä laatastona. Laatat kantavat pystysuuntaisia kuormia sekä siirtävät vaakakuormat kantaville seinille. Välipohjat on ankkuroitava pystyrakenteisiin niin, että laataston kuormat siirtyvät pystyrakenteisiin suunnitellusti. (Leskelä 2008, 527.)

Ontelolaatastoissa levyvaikutuksen muodostuminen varmistetaan saumavaluilla ja laattakentän ympäri tulevalla saumaraudoitteella esimerkiksi kuvan 4 mukaisesti (Elementtisuunnittelu 2010a).



Kuva 4. Jäykistävän seinäelementin liitos ontelolaattaväliin (Elementtisuunnittelu 2010b).

## 2.5 Rakennneosien mitoitus

Mitoitettaessa jäykistysjärjestelmää huomioidaan kaikki seinälle tulevat pysty- ja vaakakuormat. Kuormia ovat yleensä seinän omapaino, laatastolta ja yläpuolisilta rakenteilta tulevat jäykistyskuormat, tuulikuorma, rakenteiden vinouden ja epäkeskisyyden aiheuttamat vaakakuormat sekä maanpaine. Lisäksi vaakakuormia aiheuttavat jännevoimat, törmäys- ja jarrukuormat, kutistuma, virumat ja toisen kertaluvun vaakakuormat. (Elementtisuunnittelu 2010a.)

Rakennuksen jäykistystä mitoitettaessa on vaakasuorat tasorakenteet mitoitettava ottaen vastaan vaakakuormat. Vaakasuorat tasot toimivat jäykkinä levyinä jakaen voimat seinille seinien jäykkyysien suhteessa. Tasojen ja pystyjäykisteiden väliset liitokset mitoitetaan aina vaakakuormien tukireaktoille. Jäykistysjärjestelmä siirtää kuormat perustuksille ja maapohjaan. Suunniteltaessa on huomioitava mahdolliset vetorasitukset, jotka on ankuroitava maapohjaan tai rakenteisiin, joiden paino on suurempi kuin vetovoima. (Elementtisuunnittelu 2010a.)

Toisen kertaluvun vaikutuksella on merkitystä erityisesti korkeissa rakennuksissa sekä hoikissa rakenteissa ja nämä on selvitettävä tarvittaessa ja huomioitava mitoituksessa.

Toisen kertaluvun vaikutusta ei käsitellä tässä opinnäytetyössä. (Elementtisuunnittelu 2010a.)

### 2.5.1 Kuormitusyhdistelmät

Rakenteet on suunniteltava kestäämään kaikki niihin todennäköisesti kohdistuvat kuormat sekä säilyttämään käyttökelpoisuutensa koko käyttöiän ajan. Mitoitus perustuu rajatilamitoitukseen, jossa muodostetaan rakenne- ja kuormitusmalleja asianomaista rajatilaa varten. Murto- ja käyttörajatilat käsitellään erikseen ja näistä murtorajatilamitoitus liittyy turvallisuuteen ja rakenteiden varmuuteen. Käyttörajatila liittyy rakenteiden toimintaan normaalikäytössä, rakennuksen ulkonäköön ja mukavuuteen. Mitoituksessa tarkistetaan normaalin käytön ja toteutuksen aikaiset tilanteet sekä onnettomuustilanteet. (RIL 201-1-2017, 25, 29–30).

Jäykistävät rakenteet ovat tasapainossa, kun mitoitusarvo tasapainoa heikentäville kuormille on pienempi tai vähintään yhtä suuri kuin tasapainoa parantavien kuormien mitoitusarvo. Rakennuksen jäykistysrakenteen kaatumistarkastelu tehdään murtorajatilassa tarkastelemalla rakenteen staattisen tasapainon rajatilaa (kaava 1).

$$\left. \begin{matrix} 1,1K_{Fi} \\ 0,9 \end{matrix} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_P P + 1,5K_{Fi} Q_{k,1} + 1,5K_{Fi} \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Kaava 1. Staattinen tasapaino, EQU/sarja A (RIL 201-1-2017, 40).

Staattisen tasapainon rajatilassa epäedulliset, tasapainoa heikentävät pysyvät kuormat kerrotaan kertoimella  $1,1K_{Fi}$  ja tasapainoa parantavat kuormat kertoimella  $0,9$ . Kuormakerroin  $K_{Fi}$  määräytyy taulukossa 1 osoitettujen seuraamusluokkien mukaan seuraavasti:

Taulukko 1. Kuormakerroin (RIL 201-1-2017, 39).

Kuormakerroin $K_{Fi}$	Seuraamusluokka
1,1	CC3
1,0	CC2
0,9	CC1

Taulukosta 2 ilmenevät yhdistelykertoimien arvot.

Taulukko 2. Yhdistelykertoimien arvot (RIL 201-1-2017, 38).

Kuorma	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6 <sup>**</sup> )
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30 \text{ kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160 \text{ kN}$	0,7	0,5	0,3 <sup>**</sup> )
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) <sup>*)</sup> , kun			
$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75 \text{ kN/m}^2$	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma <sup>***)</sup>	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
Pakkomuodonmuutokset	1,0	1,0	1,0
Tukien painumat	1,0	1,0	1,0

<sup>\*)</sup> Ulkotasoilla ja parvekkeilla  $\psi_0 = 0$  luokkien A, B, F ja G yhteydessä.

Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään  $\psi$ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen.

<sup>\*\*</sup>) Ajokäytävillä  $\psi_2 = 0$ .

<sup>\*\*\*</sup>) Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia.

Rakennusten eri tilat jaetaan käytön mukaan eri luokkiin. Taulukkoon 3 on koottu yleisimmät hyötykuormat.

Taulukko 3. Rakennusten hyötykuormat (RIL 201-1-2017, 71).

Luokka	Käyttötarkoitus	Pinta-ala-kuorma $q_k$ (kN/m <sup>2</sup> )	Pistekuorma $Q_k$ (kN) (portaat suluissa)	Vaakakuormat ks. huom. 5 (kN/m)
A	<b>Asunto- ja majoitustilat</b> – esim. asuinrakennusten huoneet, sairaaloiden potilas- ja toimenpidehuoneet, hotellien majoitustilat	välipohjat 2,0 portaat 2,0 parvekkeet 2,5	2,0 (2,0)	0,5
B	<b>Toimistotilat</b>	välipohjat 2,5 portaat 3,0 parvekkeet 2,5	2,0 (2,0)	0,5
C	<b>Kokoontumistilat</b>			
	C1: Tilat, joissa on pöytiä yms. esim. koulut, kahvilat, ravintolat, ruokasalit, lukusalit, vastaanottotilat	välipohjat 2,5 portaat 3,0 parvekkeet 2,5	3,0 (2,0)	1,0
	C2: Tilat, joissa on kiinteät istuimet, esim. kirkot, teatterit, elokuvateatterit, konferenssisalit, luentosalit, kokoussalit, odotussalit, asemien odotustilat	välipohjat 3,0 portaat 3,0 parvekkeet 3,0	3,0 (2,0)	1,0

### 2.5.2 Tuulikuorma

Rakennuksen jäykistävän rungon ja perustusten suunnittelussa kokonaistuulivoima voidaan laskea yksinkertaistetulla voimakerroinmenetelmällä standardin EN 1991-1-4 mukaan (RIL 201-1-2017, 123).

Tuulikuorman laskeminen voimakerroinmenetelmällä riippuu rakennuksen korkeudesta. Mataliin rakennuksiin ( $h \leq b$  tai  $h \leq 15\text{m}$ ) kohdistuvalla tuulenpaineella oletetaan olevan harjalla oleva arvo kaikissa korkeusasemissa, jolloin vaakasuuntainen kokonaistuulikuorma voidaan laskea kaavalla

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(h) A_{ref},$$

jossa

$F_w$  kokonaistuulivoima (kN)

$c_s$  rakennekerroin

$c_f$	voimakerroin
$q_p(h)$	modifioitu nopeuspaine harjan korkeudella
$A_{ref}$	tuulikuorman vaikutusala.

Kaava 2. Matalan rakennuksen tuulikuorma voimakerroinmenetelmällä (RIL 201-1-2017, 140).

Korkeiden rakennusten ( $h > b$  tai  $h > 15\text{m}$ ) tuulikuorman laskemisessa otetaan huomioon tuulen nopeuspaineen vaihtelu korkeusaseman mukaan, jolloin välttyään liian suurelta kokonaistuulikuormalta. Tuulivoima lasketaan kaavalla

$$F_w(z) = c_s c_d c_f q_p(z) b,$$

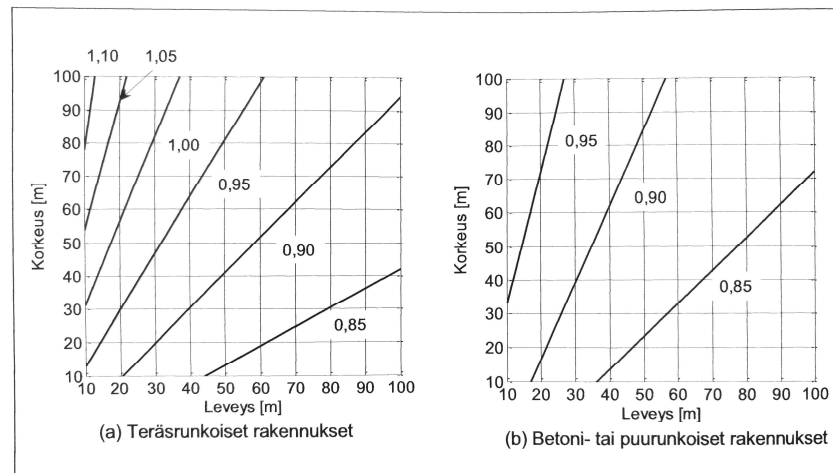
jossa

$F_w(z)$	tuulivoiman jakauma korkeussuunnassa (kN/m)
$c_s c_d$	rakennekerroin
$c_f$	voimakerroin
$q_p(z)$	modifioitu nopeuspaine
$b$	rakennuksen leveys.

Kaava 3. Korkean rakennuksen tuulikuorma voimakerroinmenetelmällä (RIL 201-1-2017, 142).

Matalien rakennuksen suunnittelussa voidaan käyttää rakennekertoimelle arvoa  $c_s c_d = 1,0$ . Korkeiden rakennusten rakennekerroin määritellään kuvan 5 mukaan, kun rakennuksen pohja on suorakaide, jäykkyys ja massa säännöllisesti jakautuneet ja ulkoseinät ovat pystysuorat.





Kuva 5. Rakennekerroin  $c_s c_d$  (RIL 201-1-2017, 142).

Voimakerroin  $c_f$  sisältää kitkan vaikutuksen ja kerrointa määritettäessä selvitetään ensin tehollinen hoikkuus (taulukko 4).

Taulukko 4. Tehollinen hoikkuus  $\lambda$  (RIL 201-1-2017, 140).

Rakenteen mittasuhteet, tuuli kohtisuoraan tasoa vasten	Tehollinen hoikkuus $\lambda$
	<p>kun <math>h &lt; 15</math> m, <math>\lambda = 2 h/b</math>  kun <math>h \geq 50</math> m, <math>\lambda = 1,4 h/b</math></p> <p>Välialueella <math>15 \text{ m} &lt; h &lt; 50 \text{ m}</math> sovelletaan interpolointia.</p> <p>Huom: Tämä ohje ei koske hyvin hoikkia rakennuksia, joille <math>\lambda &gt; 10</math>.</p>

Rakennuksen sivusuhteen ja tehollisen hoikkuuden perustella saadaan määritettyä voimakerroin taulukon 5 mukaisesti.

Taulukko 5.Voimakerroin  $c_f$  ( RIL 201-1-2017, 141).

	Sivusuhte $d/b$								
$\lambda$	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10	50
$\leq 1$	1,2	1,2	1,37	1,44	1,28	0,99	0,60	0,54	0,54
3	1,29	1,29	1,48	1,55	1,38	1,07	0,65	0,58	0,58
10	1,40	1,40	1,60	1,68	1,49	1,15	0,70	0,63	0,63

Tuulen nopeuspaineen ominaisarvo  $q_{p0}(z)$  riippuu maastoluokasta ja tasaisessa maastossa  $q_{p0}(z) = q_p(z)$ . Maastoluokittelu (kuva 5) ei huomioi mäkien ja harjanteiden aiheuttamia lisäyksiä tuulen nopeuspaineeseen. Maaston pinnanmuoto on huomioitava erikseen. Tässä opinnäytetyössä pinnanmuodon vaikutusta tuulen nopeuspaineeseen ei käsitellä.



Kuva 5. Maastoluokkien kuvaukset (RIL 201-1-2017, 131).

Rakennuksen korkeus  $z$  lasketaan maanpinnasta ja taulukosta 6 selviää nopeuspaineen ominaisarvo maastoluokan ja rakennuksen korkeuden perusteella.

Taulukko 6. Puuskanopeuspaineen ominaisarvo  $q_{p0}(z)$  tasaisessa maastossa (RIL 201-1-2017, 137).

z (m)	Maastoluokka				
	0	I	II	III	IV
0	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
1	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
2	0,78	0,52	0,39	0,35	0,32
5	0,96	0,65	0,53	0,35	0,32
8	1,05	0,73	0,61	0,43	0,32
10	1,09	0,76	0,65	0,47	0,32
15	1,18	0,83	0,72	0,55	0,40
20	1,24	0,88	0,77	0,60	0,45
25	1,29	0,92	0,82	0,65	0,50
30	1,33	0,95	0,85	0,68	0,54
35	1,37	0,98	0,88	0,72	0,57
40	1,40	1,01	0,91	0,74	0,60

### 2.5.3 Lisävaakavoimat

Jäykistäviin rakenteisiin aiheutuva lisävaakavoima lasketaan SFS-EN1992-1-1:n mukaisesti. Ellei lisävaakavoimien laskennassa käytetä normaaleja tiukempia toleransseja, jolloin noudatetaan materiaalien eurokoodeissa esitettyjä tapoja, voidaan rakennuksen lisävaakavoimat laskea kaavoilla

$$H_{dt} = N_d / 150 \quad \text{rakennuksen pidemmässä suunnassa}$$

$$H_{dl} = \frac{b}{l} \times \frac{N_d}{150} \geq \frac{N_d}{250} \quad \text{rakennuksen lyhyemmässä suunnassa,}$$

jossa

$$H_{dt} \text{ ja } H_{dl} \quad \text{lisävaakavoiman laskenta-arvot}$$

$$N_d \quad \text{lisävaakavoiman aiheuttava pystykuorman laskenta-arvo}$$

$$l \quad \text{rakennuksen pituus}$$

$$b \quad \text{rakennuksen leveys.}$$

Kaava 4. Lisävaakavoimat (RIL 201-1-2017, 78).

Lisävaakavoimat jakautuvat pystyrakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa ja vaikutussuunta määräytyy sen suunnan mukaan, joka vaikuttaa eniten rakennuksen stabiiliuteen. Kuormien ei oleteta esiintyvän samanaikaisesti. Kaikki ylä- ja välipohjien lisävaakavoimat sijoitetaan kantavan vaakarakenteen painopisteen tasolle. (RIL 201-1-2017, 78–79.)

#### 2.5.4 Kokonaisvaakavoiman jakautuminen jäykistäville seinille

Kokonaisvaakavoima jakautuu jäykistysosina toimiville mastoseinille niiden suhteellisen jäykkyyden mukaan. Kun seinillä on sama kimmokerroin, korkeus ja seinän paksuus, voidaan seinien jäykkyyksiä vertailla kaavalla  $b_i^3$ , jossa  $b$  on seinän leveys. Muissa tapauksissa seinän jäykkyys voidaan laskea kaavoilla

$$k_y = \frac{3EI_x}{L^3}$$

$$k_x = \frac{3EI_y}{L^3},$$

jossa

$k_y$  seinän y-suuntainen jäykkyys

$k_x$  seinän x-suuntainen jäykkyys

$E$  kimmokerroin

$I_i$  jäyhyysmomentti.

Kaava 5. Seinän jäykkyys (Saarinen ym. 1992, 514).

Jäyhyysmomentti / saadaan laskettua kaavalla

$$I = bd^3/12,$$

jossa

$b$  seinän paksuus

$d$  seinän leveys.

Kaava 6. Jäyhyysmomentti (Leskelä 2008, 183).

Jäykistävien seinien sijaitessa rakennuksessa symmetrisesti, ei jäykistäviin rakenteisiin muodostu kiertymää, jolloin tämä voidaan jättää huomiotta ja jäykistäville seinille kohdistuva kuorma (Q) voidaan laskea kaavalla

$$Q_y = \frac{k_y}{\sum k_y} F_y,$$

jossa

$k_y$  seinän y-suuntainen jäykkyys.

Kaava 7. Jäykistävän seinän kuorma vaakavoimista. (Saarinen ym. 1992, 514).

Usein rakennukset ovat sen verran monimuotoisia, ettei ulkoisen kuorman resultantti kulje kiertokeskiön kautta. Rakennetta kuormittaa näissä tapauksissa vaakavoimien lisäksi kiertävä momentti eli välipohjaan kohdistuu siirtymän lisäksi kiertymää, joka vaikuttaa kuormien jakautumiseen seinille.

Jäykistävien seinien siirtymäjäykkyyden avulla voidaan laskea kiertokeskiön R koordinaatit kaavalla 8.

$$\bar{x} = \frac{\sum k_y x'}{\sum k_y} \quad \text{ja} \quad \bar{y} = \frac{\sum k_x y'}{\sum k_x}$$

Kaava 8. Kiertokeskiö (Saarinen ym. 1992, 514).

Kiertokeskiön avulla saadaan laskettua laatastoa kiertävä momentti kaavalla

$$M = F_y x_1 - F_x y_1$$

Kaava 9. Rakennetta kuormittava momentti (Saarinen ym. 1992, 514).

Koordinaatistossa, jossa origo on kiertokeskiössä R, voidaan jäykistävien seinien jäykkyydpainopisteiden koordinaatit laskea kaavalla 10. Jos jäykistävän osan poikkileikkaus on eri kuin suorakaide, esimerkiksi U- tai L-muoto, tai seinissä on aukkoja, on käsinlaskeaminen monimutkaisempaa. Seuraavia kaavoja voidaan käyttää niissä tapauksissa, joissa jäykistävät osat ovat suorakaiteen muotoisia.

$$x = x' - \bar{x} \quad y = y' - \bar{y}$$

Kaava 10. Jäykistävien seinien jäykkyydpainopisteet (Saarinen ym. 1992, 515).

Siirtymät ratkaistaan kaavalla 11 ja kiertymä kaavalla 12.

$$v_x = \frac{F_x}{\Sigma k_x} \quad v_y = \frac{F_y}{\Sigma k_y}$$

Kaava 11. Siirtymä x- ja y-suuntaan (Saarinen ym. 1992, 515).

$$\theta = \frac{M}{\Sigma k_x y^2 + \Sigma k_y x^2}$$

Kaava 12. Kiertymä (Saarinen ym. 1992, 515).

Lopuksi voidaan laskea vaakavoimien aiheuttamat kuormat jäykistäville seinille jäykkyyksien ja siirtymien avulla kaavan 13 mukaisesti.

$$Q_x = k_x v_x - k_{xy} \theta$$

$$Q_y = k_y v_y + k_{yx} \theta$$

Kaava 13. Jäykistävien seinien kuorma vaakavoimista (Saarinen ym. 1992, 515).

## 3 FEM-MALLINNUS

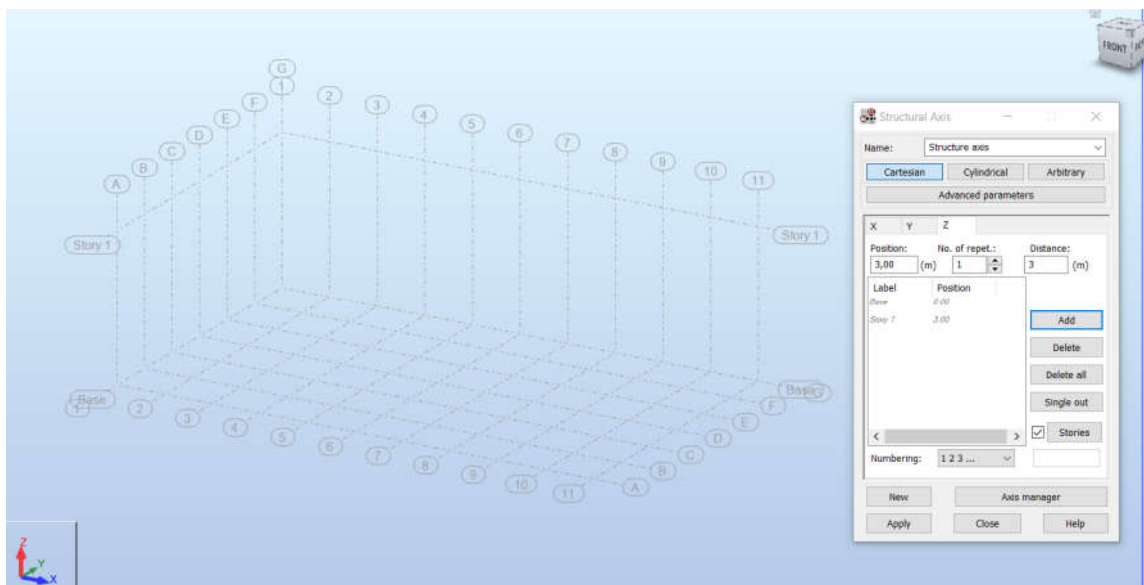
### 3.1 Yleistä FEM-mallinnuksesta

FEM-mallinnuksessa korostuu mallinnuksen oikeellisuus. Pienet asiat mallinnuksessa vaikuttavat huomattavasti laskentatuloksiin ja vaativammissa kohteissa laskelmien tarkistus tulisi tehdä aina jollakin toisella laskentamenetelmällä. Mallinnuksessa huomioon otettavia asioita ovat muun muassa sauvarakenteiden ja levyrakenteiden liittymien mallinnus oikein. Rakenneosien ja liitosten on pystyttävä välittämään ne voimat, jotka ohjelma laskee niiden välittävän. Huomioitavaa on myös, että ohjelmaan on syötetty oikeat materiaaliominaisuudet, kuten materiaalin lujuus. Elementtirakenteissa käytetyt ontelo-laatat toimivat yhtenäisenä levyrakenteena, ja tämä on otettava huomioon mallinnuksessa. (Elementtissuunnittelu 2010a.)

### 3.2 Rakenneosien mallinnus

Vaakavoimien siirtymistä jäykistäväville seinille aloitettiin tutkimaan luomalla Robotiin yksinkertainen malli. Aukkoja ei huomioitu, koska näiden käsinlaskeminen on monimutkaista. Rakenneosista mallinnetaan ainoastaan ne osat, joiden tuloksia halutaan eli tässä tapauksessa mallinnetaan jäykistävät seinät. Yleensä jäykistävät seinät pyritään sijoittamaan rakennukseen symmetrisesti, jolloin rakenteeseen ei aiheudu siirtymää ja kiertymää, mutta yleensä tämä ei ole mahdollista.

Mallinnus voidaan aloittaa esimerkiksi tuomalla pohjalle AutoCAD-malli tai luomalla Robotiin moduuliverkko (kuva 6). Tämän saa luotua axis-toiminnosta, jossa syötetään halutun moduuliverkon mitat ja muut tiedot.



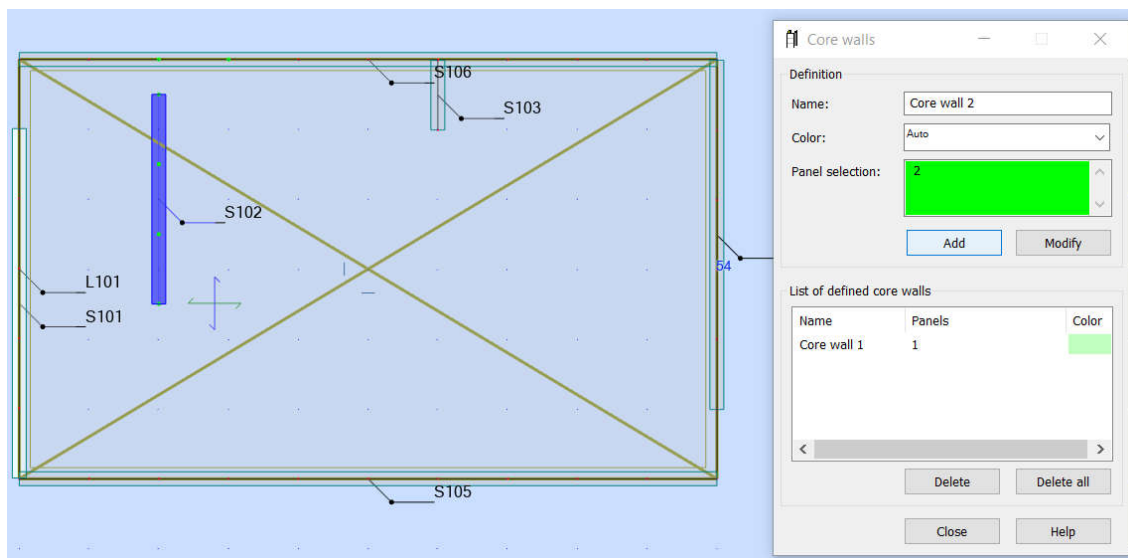
Kuva 6. Moduuliverkko.

Analysis-valikon alta löytyy toiminto meshing, jolla saadaan määritettyä laskentaverkon tiheys. Verkon tiheys vaikuttaa Robotin antamien tulosten tarkkuuteen. Esimerkkeihin valittiin laskentaverkon mitaksi yksi metri. Viivakuormat ilmoitetaan yleensä kuormana kN/m ja Robotin antaessa tuloksen metrin välein on tämän perusteella helpompi laskea esimerkiksi tartunnoille tulevat kuormat. Myös tiheämpää verkkoa kokeiltiin, mutta tuloksissa ei ollut näissä tapauksissa merkittävää eroa.

Moduuliverkon jälkeen mallinnettiin ensimmäisen kerroksen seinät. Kantavissa sandwich-elementeissä sisäkuori on yleensä kantava ja kuoren normaali paksuus on 150 mm. Kantavat väliseinät ovat 200 mm paksuja elementtejä. Sandwich-elementeistä mallinnetaan ainoastaan kantavat sisäseinät ja ulkoseinät, huomioidaan sisäkuorelle tulevana pysyvänä kuormana.

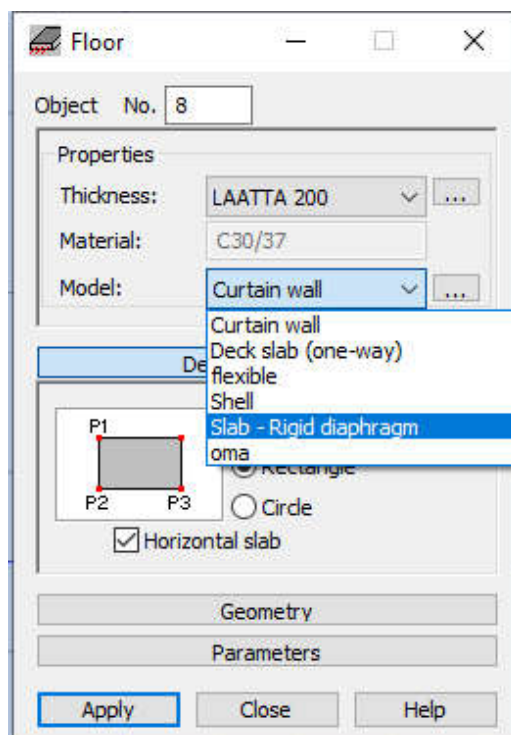
Robotissa on toiminto core wall (kuva 7), mikä yhdistää seinät profiiliksi, mikä toimii yhtenäisenä jäykisteenä koko rakennuksen korkeuden. Core wall -toiminnolla voidaan esimerkiksi hissikuilun jäykistävät seinät voidaan muuttaa yhtenäiseksi profiiliksi.





Kuva 7. Core wall.

Ontelolaatat on mahdollista mallintaa Robotissa valitsemalla laattavalikosta kohdan hollow slab. Asuinrakentamisessa käytetään yleisesti 200 tai 265 mm paksuja ontelolaattoja. Mallinnuksen yksinkertaistamiseksi tässä työssä laatta mallinnetaan 265 mm paksun ontelolaatan painolla eli 3,8 kN, mikä vastaa 154,9 mm vahvuista teräsbetonilaattaa. Ontelolaatat ovat yhteen suuntaan kantavia ja mallinnuksessa on huomioitava, että rengasraudoitus sitoo laatat yhtenäiseksi tasoksi. Laatan malliksi on muutettava slab-rigid diaphragm (kuva 8), jotta laatasto siirtää vaakakuormat yksittäisille seinille. Samasta valikosta valitsemalla deck slab (one-way) saadaan laatta yhteen suuntaan kantavaksi. Tämä on huomioitava ontelolaatoilla, kun lasketaan kantaville seinille tulevia pystykuormia.

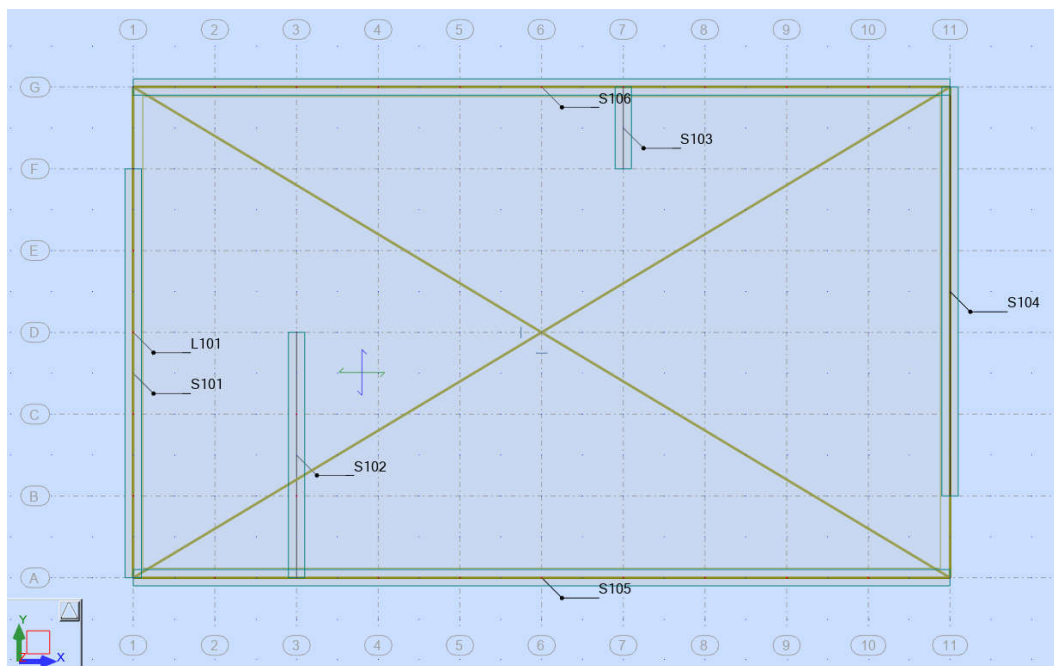


Kuva 8. Laatan mallinnus.

Vaakakuormat mallinnetaan viivakuormana jokaisen kerroksen yläreunaan. Ensimmäisissä malleissa vaakakuormia ei ole laskettu, vaan kuormiksi on valittu x-suuntaan 30 kN ja y-suuntaan 60 kN ja näiden avulla on verrattu käsinlaskennan tuloksia Robotin laskelmiin.

### 3.3 Tulosten vertailut

Ensimmäisessä esimerkissä on neljä eri mallia, joissa on tehty pieniä muutoksia malliin 1 ja tutkittu näiden vaikutusta Robotin antamiin tuloksiin. Kuvassa 9 näkyy mallissa 1 olevien seinien sijainti. Mallien 1–4 tarkemmat tiedot ja Robotin ja Excel-laskennan tulokset löytyvät liitteestä 1. Malleissa on siirretty seiniä ainoastaan niiden pituuden suunnassa. Tämän ei pitäisi vaikuttaa seinien ottamiin kuormiin, koska laatasta kiertävä momentti ei näissä tapauksissa muutu, joten Excel-taulukon tulokset ovat näissä kaikissa samat.



Kuva 9. Malli 1, seinien sijainti.

Taulukko 7 havainnollistaa Robotin antamat tulokset verrattuna Excel-taulukkoon. Mallissa 1 on tarkasteltu tilannetta, missä y-suuntaiset seinät ovat kiinni x-suuntaisissa seinissä. Mallissa 2 seinien väliin on jätetty 10 mm:n väli, jolloin Robotin tulokset ovat lähempänä käsinlaskennan tuloksia. Mallissa 3 on käytetty pohjana mallia 2 ja seinissä on käytetty toimintoa core wall. Mallissa 4 on siirretty seinää S102 pituussuuntaisella suoralla. Tuloksissa ei ole muutoksia edellisiin verrattuna, joten seinän siirtäminen pituusakselinsa suunnassa ei vaikuta Robotin tuloksiin, jos seinät eivät ole kiinni toisissa seinissä. X-akselin suuntaiset seinät S105 ja S106 sijaitsevat malleissa 1-4 symmetrisesti vaakakuorman resultantin suhteen ja tulokset ovat lähes samat Excel-taulukon ja Robotin välillä.

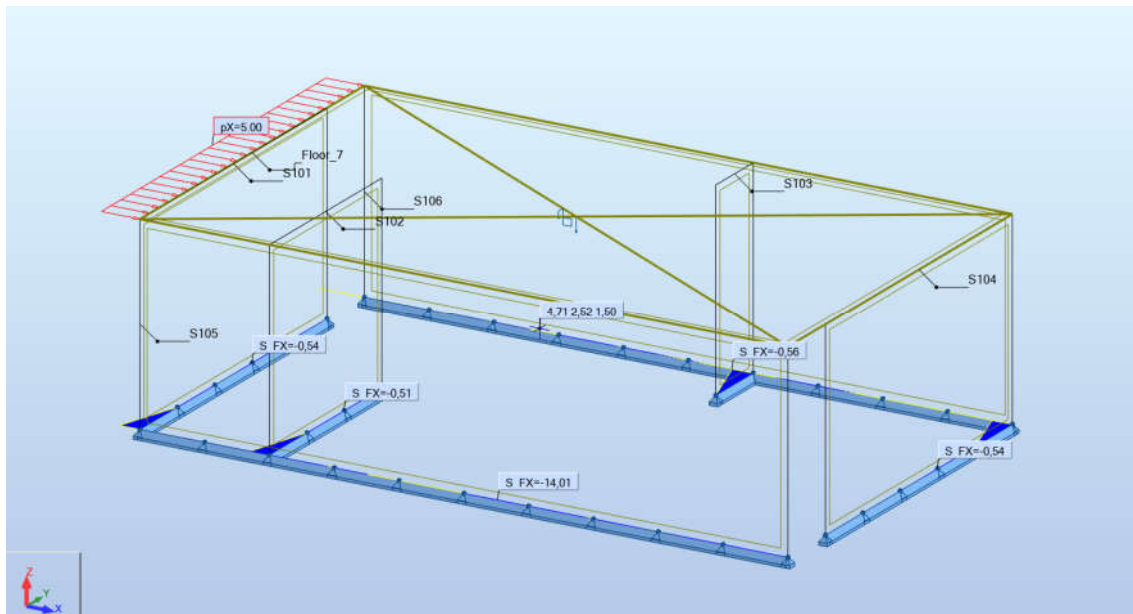
Taulukko 7. Tulosten vertailu, mallit 1-4.

Y-suunt. seinä	Excel (kN)	MALLI 1		MALLI 2		MALLI 3		MALLI 4	
		Robot (kN)	Ero (%)	Robot (kN)	Ero (%)	Robot (kN)	Ero (%)	Robot (kN)	Ero (%)
S101	26,56	20,22	-23,9	24,01	-9,6	24,01	-9,6	24,01	-9,6
S102	5,78	9,11	57,6	8,81	52,4	8,81	52,4	8,81	52,4
S103	0,22	1,75	695,5	0,62	181,8	0,62	181,8	0,62	181,8
S104	27,44	23,61	-14,0	26,57	-3,2	26,57	-3,2	26,57	-3,2
Σ	60,00	54,69		60,01		60,01		60,01	

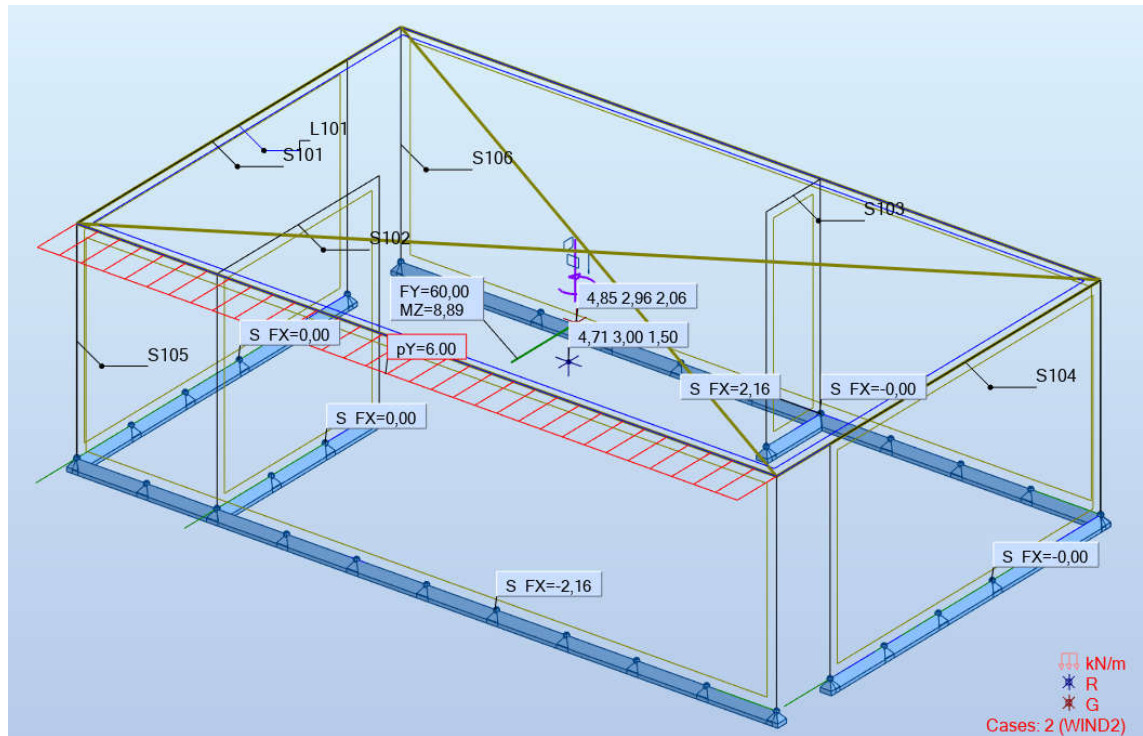
X-suunt. seinä	Excel (kN)	MALLI 1		MALLI 2		MALLI 3		MALLI 4	
		Robot (kN)	Ero (%)	Robot (kN)	Ero (%)	Robot (kN)	Ero (%)	Robot (kN)	Ero (%)
S105	15,00	14,01	-6,6	15,01	0,1	15,01	0,1	15,01	0,1
S106	15,00	14,95	-0,3	14,99	-0,1	14,99	-0,1	14,99	-0,1
Σ	30,00	28,96		30,00		30,00		30,00	

Tarkastellaan lähemmin mallia 1, jossa seinät ovat kiinni toisissa seinissä. Seinät sijaitsevat symmetrisesti voimaan nähden, jolloin tämä ei aiheuta momenttia laatalle. Kuvasta 10 havaitaan, että x- ja y-suuntaisten seinien ollessa kiinni toisissaan vaakavoima siirtyy myös voimaa vastaan kohtisuorassa oleville seinille. Tämä aiheuttaa suuremman eron Excel-laskennan tuloksiin kuin malleissa 2-4.



Kuva 10. Vaakavoiman siirtyminen jäykistäville seinille.

Laataston kiertyessä myös vaakavoimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa oleville seinille siirtyy kuormaa. Kuvassa 11 näkyy kiertokeskiö (R) ja kerroksen painopiste (G). Painopiste sijaitsee 15 cm:n etäisyydellä vaakavoiman resultantista, mikä aiheuttaa laatastoon kiertävän momentin 8,89 kNm. Voimaa vastaan kohtisuorassa olevat seinät ottavat vastaan kiertymästä aiheutuvaa kuormaa.



Kuva 11. Laatastoa kiertävä momentti.

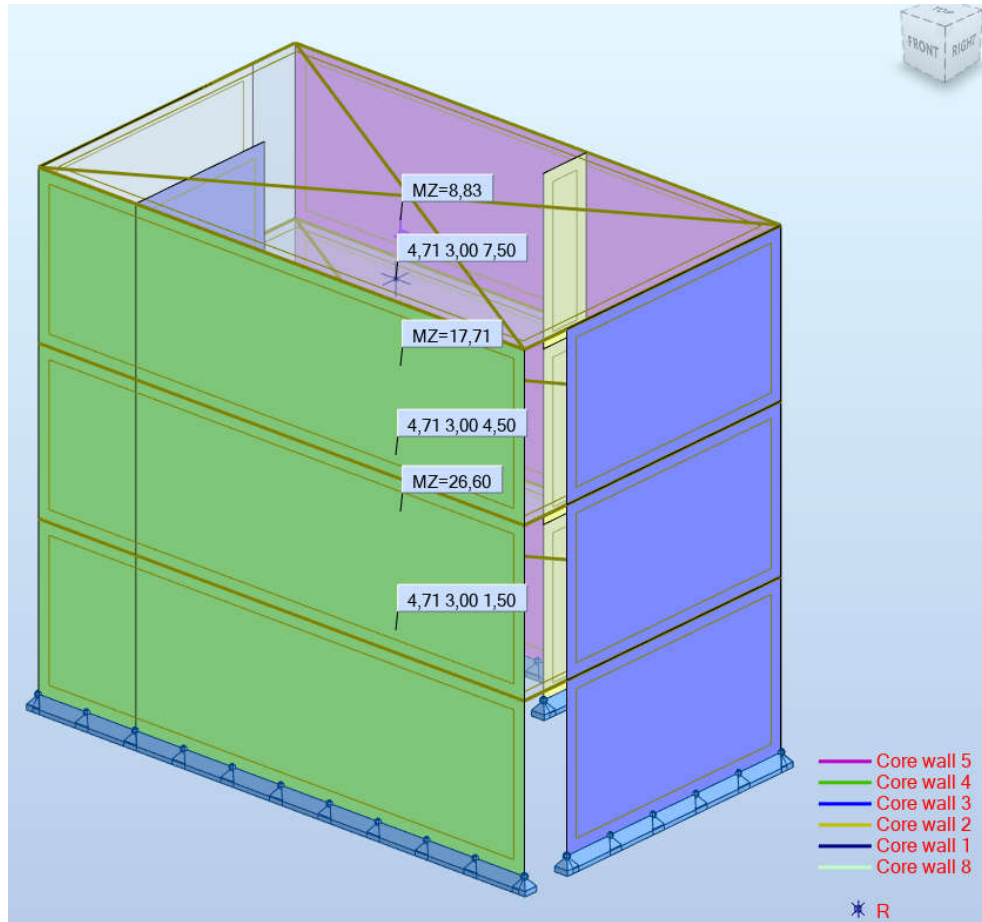
Esimerkissä 2 (liite 2) on siirretty seinää S104 kolme metriä vasemmalle, jolloin kierto-keskiön paikka muuttuu ja käsinlaskenta on suoritettava uudestaan. Taulukon 8 tuloksista näkee, että eroja on edelleen tuloksissa.

Taulukko 8. Mallin 5 tulokset.

Y-suunt. seinä	MALLI 5		
	Excel (kN)	Robot (kN)	Ero (%)
S101	25,02	20,75	-17,1
S102	5,66	8,42	48,8
S103	0,23	0,7	204,3
S104	29,09	30,14	3,6
Σ	60,00	60,01	

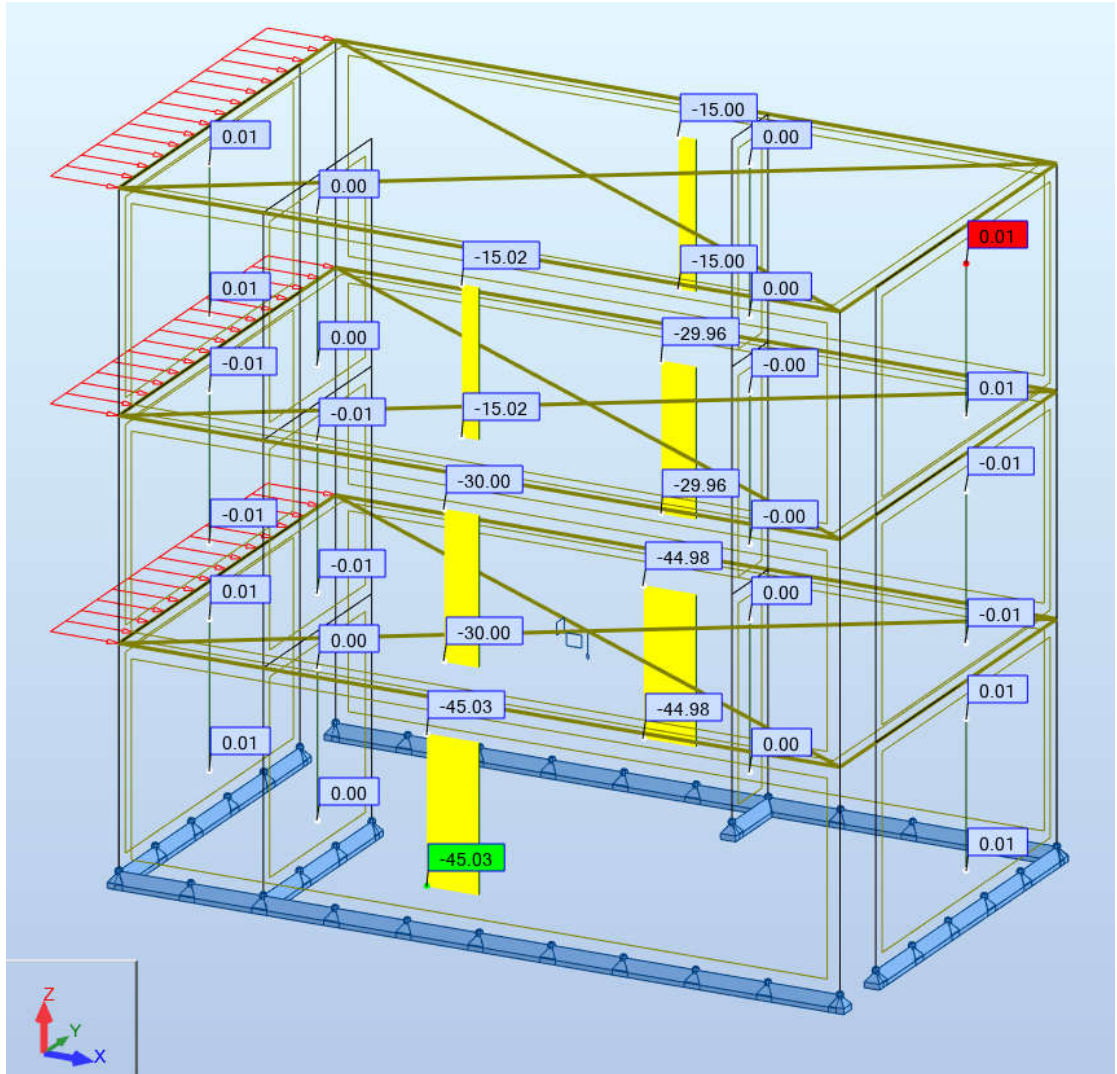
X-suunt. seinä	MALLI 5		
	Excel (kN)	Robot (kN)	Ero (%)
S105	15,00	15,01	0,1
S106	15,00	14,99	-0,1
Σ	30,00	30,00	

Seuraavaksi on tarkasteltu mallin 2 pohjalta tehtyä kolme kerroksista rakennusta (malli 6) ja siihen vaikuttavia vaakavoimia. Seinät on muutettu kolme kerrosta korkeiksi jäykistäviksi profileiksi, joiden sijainti näkyy kuvassa 12.



Kuva 12. Jäykistävien seinien sijainti.

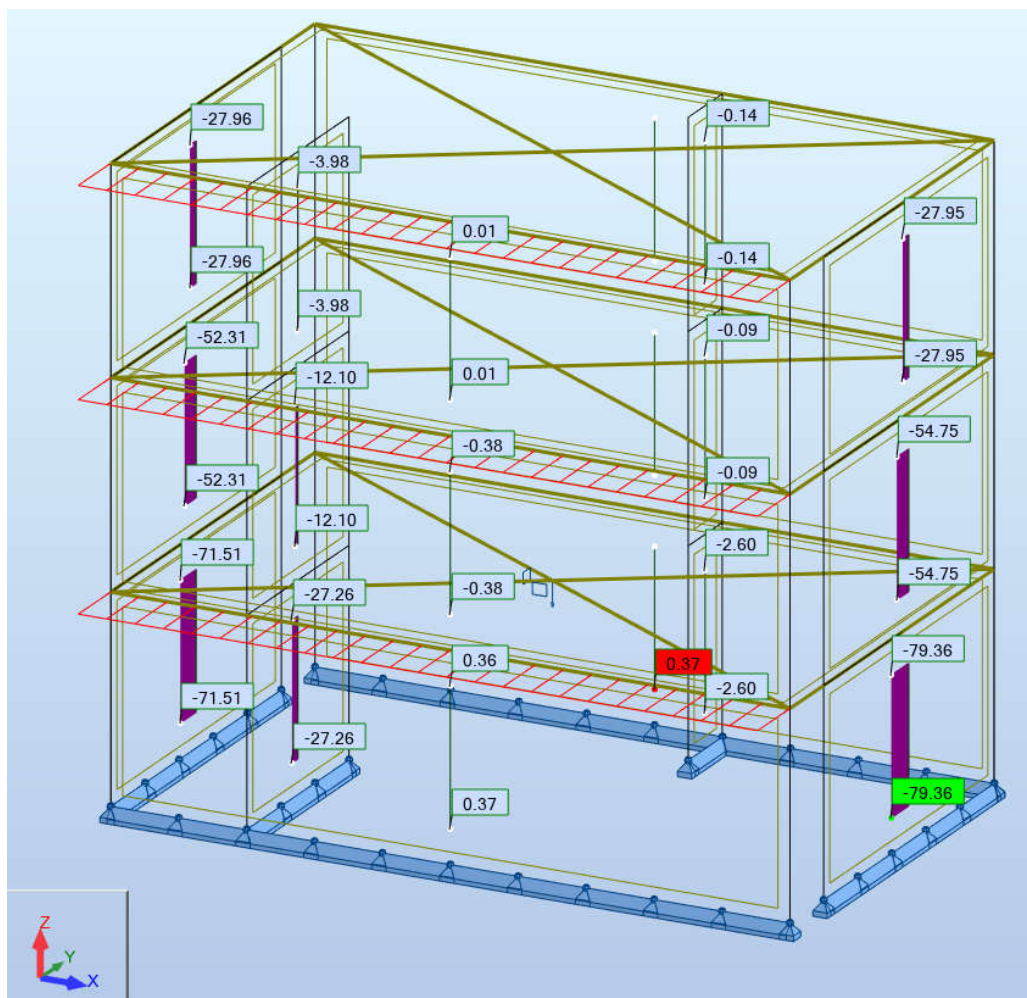
Kuvassa 12 näkyy myös eri kerroksille tuleva laatastoa kiertävä momentti, kun tuuli on y-akselin suuntainen. Vaakakuormien suuruus on mallissa sama jokaisen kerroksen kohdalla. Kuvassa 13 jäykistävät x-suuntaiset seinät sijaitsevat symmetrisesti vaakakuorman suuntaan ja nähdään, että leikkausvoima kasvaa vaakavoiman mukaan jokaisen kerroksen kohdalla.



Kuva 13. X-akselin suuntaisen vaakakuorman jakautuminen seinille.

Kun verrataan x-akselin suuntaisen vaakavoiman jakautumista seinille ja y-akselin suuntaisen vaakavoiman jakautumista seinille (kuva 14), huomataan, että erot eivät ole yhtä selkeät.





Kuva 14. Y-suuntaisen vaakakuorman jakautuminen seinille.

Viimeisenä esimerkkinä tarkastellaan liitteessä 3 näkyvää täysin symmetristä rakennusta, jossa vaakavoimat eivät aiheuta laatastoon kiertävää momenttia. Esimerkissä kokeiltiin myös, minkälaisia tuloksia Robot antaa, jos seinän korkeutta muutetaan. Käsinelaskennassa seinän korkeuden muutoksella on lähes olematon vaikutus voimien jakautumiseen seinille. Voimat jakautuvat seinille pituuden perusteella laskettujen taivutusjäykkyyksien suhteessa. Robotissa seinän korkeudella on vaikutusta, kuten taulukosta 9 näkyy. Tuloksissa on kuitenkin edelleen eroa ja vaikuttaa, että Robotissa ei seinän pituus korostu voimien jakautumisessa. Mitä korkeampi seinä, sitä lähempänä tulokset ovat käsinelaskennan tuloksia.



Taulukko 9. Mallin 7 vertailut.

Y-suunt. seinä	MALLI 7				
	Excel 1 (kN)	Excel 2 (kN)	Robot (kN) h=3m	Robot (kN) h=5m	Robot (kN) h=7m
S101	38,779	38,764	23,45	27,57	30,76
S102	2,805	2,801	6,64	5,61	4,81
S103	2,805	2,801	6,64	5,61	4,81
S104	2,805	2,803	6,64	5,61	4,81
S105	2,805	2,803	6,64	5,61	4,81
S106	2,805	2,805	6,64	5,61	4,81
S107	2,805	2,805	6,64	5,61	4,81
S108	2,805	2,808	6,64	5,61	4,81
S109	2,805	2,808	6,64	5,61	4,81
S110	38,779	38,77	23,45	27,57	30,76
Σ	100,00	99,97	100,02	100,02	100,00

X-suunt. seinä	MALLI 7				
	Excel 1 (kN)	Excel 2 (kN)	Robot (kN) h=3m	Robot (kN) h=5m	Robot (kN) h=7m
S105	30,00	29,94	30,00	30,00	30,00
S106	30,00	30,03	30,00	30,00	30,00
Σ	60,00	59,98	60,00	60,00	60,00

Tulosten eroavaisuuden takia laskettiin jäykistäville seinille tuleva tuleva kuorma myös toisella tavalla (taulukko 8, Excel 2). Käsinlaskennan tuloksissa ei ole suurta eroa. Excel-taulukon laskentatapaa 2 ei käsitellä tässä opinnäytetyössä tarkemmin ja ohjeet löytyvät lähdeluettelossa näkyvästä kirjasta Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008.

Robotin mallissa seinät eivät ole kiinni toisissaan, joten tämä ei aiheuta eroja. Mallia testattiin myös ottamalla pois vaakavoimaa vastaan kohtisuorassa olevat seinät, mutta tällä ei ollut vaikutusta tuloksiin. Jos robotista poistaa kyseiset seinät, muuttuu kiertokeskiön sijainti ja rakenteesta tulee epästabiili. Excel-taulukossa käytetty kimmokerroin on myös sama kuin Robotissa, joten tämäkään ei vaikuta tuloksiin. Kaikissa esimerkeissä on havaittavissa, että Robot laskee lyhyemmille seinille suhteessa suuremman kuorman kuin käsinlaskennan tulokset antavat.

### 3.4 Pystykuormat

Mallin 1 pohjalta tehtiin pystykuormien vertailu käsinlaskemalla ja Robotilla. Teräsbetonin tilavuuspainona on käytetty Robotissa ollutta arvoa  $24,53 \text{ kN/m}^3$ . Laskelmissa on huomioitu seinien ja laatan omapaino sekä laatalle tuleva hyötykuorma normaali

asuinrakennuksen hyötykuorma  $2 \text{ kN/m}^2$ . Laatta on yhteen suuntaan kantava rakennuksen lyhyemmässä suunnassa ja tämä on huomioitu mallinnettaessa laatta Robottiin.

Taulukon 10 tuloksista nähdään tuloksien olevan lähes yhtenäiset. Käsineläskennassa on huomioitu laatalta tuleva pieni kuorma seinille S101-S104. Ontelolaatta on yhteen suuntaan kantava, joten suurin kuorma laatalta tulee seinille S105 ja S106. koska laatan omapaino ja hyötykuorma siirtyvät suurimmaksi osaksi näille seinille. Liitteessä 4 näkyvät robotin tulokset pystykuormista.

Taulukko 10. Pystykuormien vertailu.

#### Pystykuormat

Seinä	$A_{\text{seinä}} (\text{m}^2)$	$h (\text{m})$	kN	$A_{\text{laatta}} (\text{m}^2)$	Kuorma laatalta (kN)	Yht. (kN)	ROBOT (kN)
S101	15	0,2	73,59	1,00	5,60	79,19	79,24
S102	9	0,2	44,15	1,20	6,72	50,87	51,35
S103	3	0,2	14,72	0,40	2,24	16,96	20,28
S104	15	0,2	73,59	1,00	5,60	79,19	79,59
S105	30	0,2	147,18	28,20	157,92	305,10	302,35
S106	30	0,2	147,18	28,20	157,92	305,10	303,6
Omapaino + hyötykuorma					$\Sigma$	836,41	836,41

Seinä	24,53	$\text{kN/m}^3$
Laatta	3,6	$\text{kN/m}^3$
Hyötykuorma	2	$\text{kN/m}^3$

Laatta yhteen suuntaan kantava

### 3.5 Palvelutalo Hirvensalmi

Palvelutalo Hirvensalmi on Hirvensalmelle rakennettava puurunkoinen 2-kerroksinen rakennus. Palvelutalon jäykistävät seinät toteutetaan betonielementeillä. Puurunko kantaa yläpohjan ja vesikaton kuormat, joten näitä kuormia ei ole laskelmissa huomioitu. Jäykistävälle betonielementeille tulevat pystykuormat välipohjan kuormasta ja toisen kerroksen väliseinistä.

Liitteissä 5 ja 6 näkyvät rakennuksen molempien kerrosten pohjapiirustus. Jäykistystä suunniteltaessa on mietittävä liikuntasauvojen paikka, joita tarvitaan pidemmissä rakennuksissa. Palvelutalo on jaettu liikuntasauvoilla kolmeen eri lohkoon, joista jokaista osaa on tarkasteltava erikseen kokonaisjäykistystä laskettaessa. Tässä opinnäytetyössä

keskitytään lohkoon 3. Hyötykuormana käytetään asunto- ja majoitustilojen hyötykuormaa  $2 \text{ kN/m}^2$ . Välipohjana ovat 265 mm paksut ontelolaatat, joiden päälle tulee 50 mm:n plaanovalu. Molempien lohjojen päädyissä betonielementtien paksuus on 150 mm ja lohkon keskiosassa väliseinäelementtien paksuus on 200 mm. Ontelolaatoille tulevien kevyiden väliseinien painona on käytetty  $1,2 \text{ kN/m}$ . Laskelmat lisävaakavoimasta ja tuulikuormasta löytyvät liitteestä 9.

Rakennuksen toisessa kerroksessa ei jäykistäviä elementtiseiniä ole. Ensimmäisen kerroksen jäykistävät väliseinät on merkitty pohjakuvaan liitteessä 7. Todellisuudessa oikean reunan päätyseinän elementit ovat suuremmat ja seinät ottavat vastaan enemmän vaakakuormaa. Käsinelaskennan helpottamiseksi laskennassa ja Robot-mallinnuksessa on huomioitu seinissä olevat aukot poistamalla seinät näiden kohdilta. Taulukossa 11 on laskentatulosten vertailut.

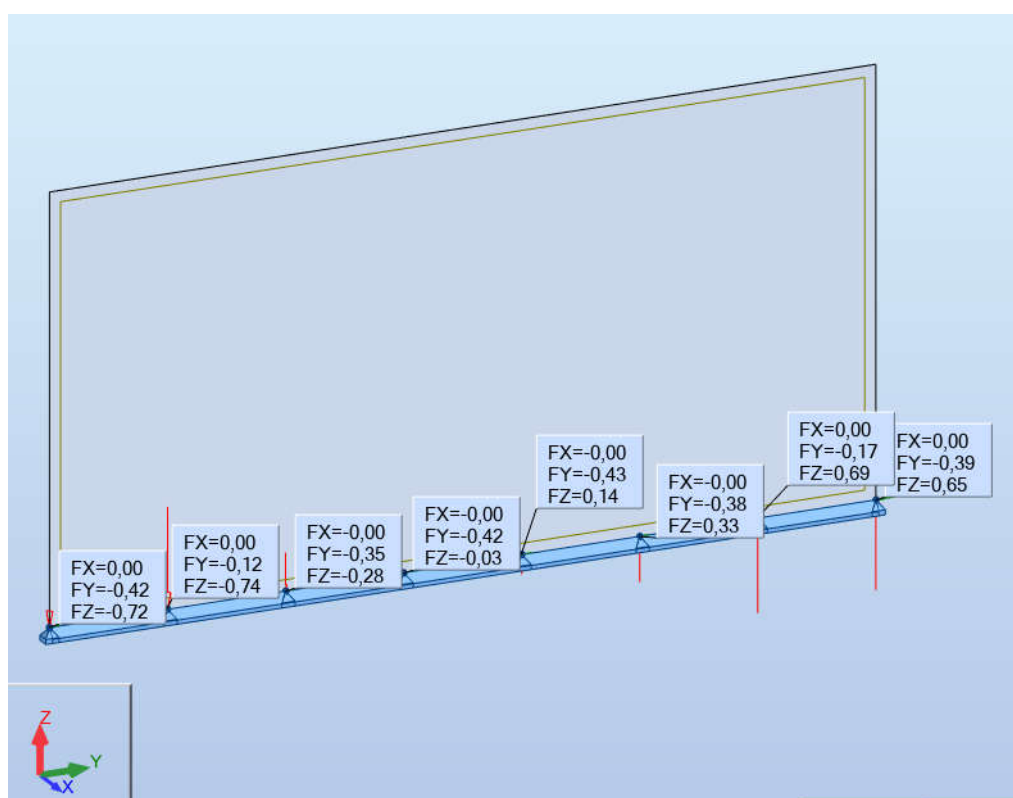
Taulukko 11. Palvelutalo Hirvensalmen tulokset.

Y-suunt. seinä	PALVELUTALO HIRVENSALMI		
	Excel (kN)	Robot (kN)	Ero (%)
KV101	3,40	3,32	-2,35
KV102	6,96	6,65	-4,45
KV103	7,39	7,90	6,90
KV104	12,93	11,78	-8,89
KV105	15,47	14,16	-8,47
KV106	0,75	1,70	126,67
KV107	0,12	0,37	208,33
KV108	0,09	0,29	222,22
KV109	0,06	0,18	200,00
KV110	0,17	0,50	194,12
KV111	3,06	3,11	1,63
KV112	6,96	6,66	-4,31
KV113	7,39	7,91	7,04
KV114	11,80	11,26	-4,58
KV115	15,92	14,36	-9,80
KV116	14,05	14,52	3,35
KV117	2,23	3,97	78,03
KV118	0,94	1,91	103,19
Σ	109,69	110,55	

X-suunt. seinä	PALVELUTALO HIRVENSALMI		
	Excel (kN)	Robot (kN)	Ero (%)
KV119	14,91	17,36	16,4
KV120	7,22	9,51	31,7
KV121	0,06	0,19	216,7
KV122	31,20	26,34	-15,6
Σ	53,39	53,40	

Tuloksissa on prosentuaalisesti suurempiakin eroja, mutta kilonewtoneissa erot ovat suhteellisen pienet. Tuloksista on tässäkin mallissa havaittavissa, että lyhyemmille seinille Robotti antaa suhteessa suuremmat kuormat kuin käsinlaskenta. Hyvin lyhyet seinät ottavat vastaan huomattavasti vähemmän vaakavoimaa vastaan, joten nämä voisi jättää kokonaan pois laskelmista.

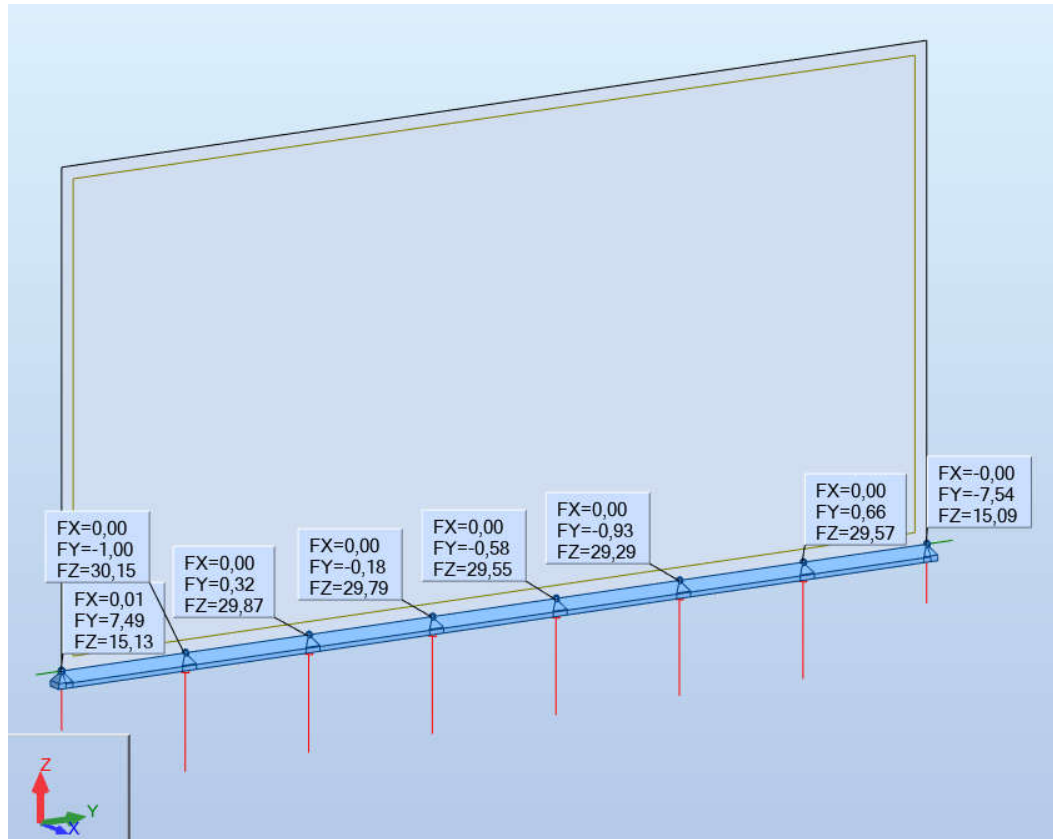
Kuvassa 15 näkyy elementti KV101 ja tähän kohdistuvat y-suuntaisten vaakakuormien aiheuttamat rasitukset metrin välein.



Kuva 15. Elementin KV101:n vaakakuormat.

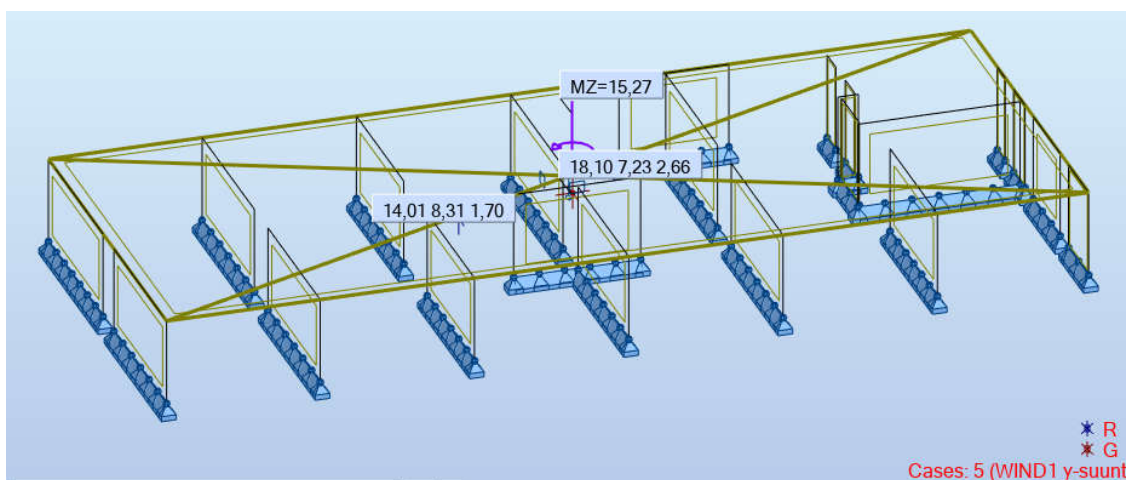
Tulosten perusteella voidaan määrittää elementille tulevat tartunnat ja nähdään, minkä verran vetoa tai puristusta elementtiin kohdistuu. Kohteesta on erikseen mallinnettu pystykuormat (liite 9), josta nähdään seinille tulevat stabiloivat kuormat.

Kuvassa 16 näkyvät KV101:een kohdistuvat pystykuormien aiheuttamat rasitukset. Ontelolaatat kantavat elementin päälle, joten laskennassa on huomioitu elementin omapaino sekä ontelolaatoilta tulevat kuormat. Kuvista 15 ja 16 on nähtävissä, että stabiloivat kuormat ovat huomattavasti suuremmat kuin kaatavat kuormat.



Kuva 16. KV101:n pystykuormat.

Rakennuksen geometrinen painopiste G (kuva 17) sijaitsee y-suuntaan pisteessä 7,23 m ja x-akselin suuntaan pisteessä 18,10 m eli painopiste on lähellä vaakavoimien resultanttia.



Kuva 17. Geometrinen painopiste.

Kuvassa 17 näkyy myös laatastoa kiertävä momentti. Jos geometrinen painopiste sijait-  
sisi kauempana vaakavoiman resultantista, kiertymän seiniin aiheuttama voima kasvaa  
ja todennäköisesti erot Robotin ja käsinlaskennan välillä kasvaisivat.

## 4 LOPUKSI

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Autodesk Robot Structural Analysis 2019 -ohjelman käyttöä rakennuksen kokonaisjäykistyksen tarkastelussa. Aihe tuntui alusta alkaen haastavalta, koska Robot-ohjelmaa en ollut kovin paljoa käyttänyt ja rakennuksen kokonaisjäykistyksen tarkastelu oli kokonaan uusi asia.

Tuloksia verrattaessa päästiin pystykuormia laskettaessa samanlaiseen lopputulokseen käsinlaskennalla ja Robotilla. Vaakavoimat Robot jakaa seinille erilailla ja tuloksissa on eroja verrattuna käsinlaskentaan. Esimerkeistä on havaittavissa, että lyhyille seinille Robot antaa suhteessa suuremmat kuormat vaakavoimista. Vertailua tehtiin myös seinän korkeutta muuttamalla. Korkeuden muutoksen vaikutus käsinlaskennassa on pieni. Robotin tuloksissa seinän korkeudella on merkitystä ja seinän korkeuden kasvaessa tulokset ovat lähempänä käsinlaskennan tuloksia. Erot käsinlaskentaan verrattuna johtuvat todennäköisesti siitä, että Robotissa korkeammilla seinillä seinän taivutusjäykkyys muodostuu määrääväksi, kun matalammilla seinillä leikkausjäykkyydellä on suurempi merkitys. Tätä asiaa tulisi tutkia vielä tarkemmin. Todennäköisesti Robotin antamat tulokset ovat lähempänä todellisuutta.

Ratkaisematta jäi myös, voidaanko pysty- ja vaakakuormat mallintaa samaan malliin, kun laatta on yhteensuuntaan kantava, jolloin tulosten tulkinta olisi huomattavasti selkeämpää kokonaisjäykistyksen kannalta.

## LÄHTEET

Elementtisuunnittelu 2010a. Jäykistysjärjestelmät. Helsinki: Betoniteollisuus ry. Viitattu 23.2.2020 <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/jaykistysjarjestelmat>

Elementtisuunnittelu 2010b. Jäykistys. Helsinki: Betoniteollisuus ry. Viitattu 22.3.2020 <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/rakenteellinen-toiminta/jaykistys>.

Leskelä, M. V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. BY 210. Jyväskylä: Suomen Betonitieto Oy.

RIL 201-1-2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat 2017. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Saarinen, E.; Kinnunen, J. & Tiira, S. 1992. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 3. 2. painos. Jyväskylä: Suomen Betoniyhdistys ry.



## Esimerkki 1. Mallit 1-4, vaakavoimien jakautuminen jäykistäville seinille.

### VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN JÄYKISTÄVILLE SEINILLE

#### Rakennus

b	10 m	Rakennuksen pituus, x-suunta
d	6 m	Rakennuksen leveys, y-suunta

#### Vaakavoimat

$F_x$	30 kN	Vaakavoima, x-suunta
$F_y$	60 kN	Vaakavoima, y-suunta

E 31000 MPa

VAAKAVOIMAN JAKAUMA, Y-SUUNTA					
Seinä	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	$x'$ (m)	$k_y$
S101	0,2	5,0	3,0	0,0	7176
S102	0,2	3,0	3,0	2,0	1550
S103	0,2	1,0	3,0	6,0	57
S104	0,2	5,0	3,0	10,0	7176
$\Sigma$					15959

VAAKAVOIMAN JAKAUMA, X-SUUNTA					
Seinä	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	$y'$ (m)	$k_x$
S105	0,2	10,0	3,0	0,0	57407
S106	0,2	10,0	3,0	6,0	57407
$\Sigma$					114815

#### Kiertokeskiö

$\bar{x}$	4,71 m
$\bar{y}$	3,00 m

#### Vaakavoimat

$F_x$	30,0 kN	b	10,0 m
$F_y$	60,0 kN	d	6,0 m

#### Momenttivarasi

$x_1$	0,288 m
$y_1$	0,000 m

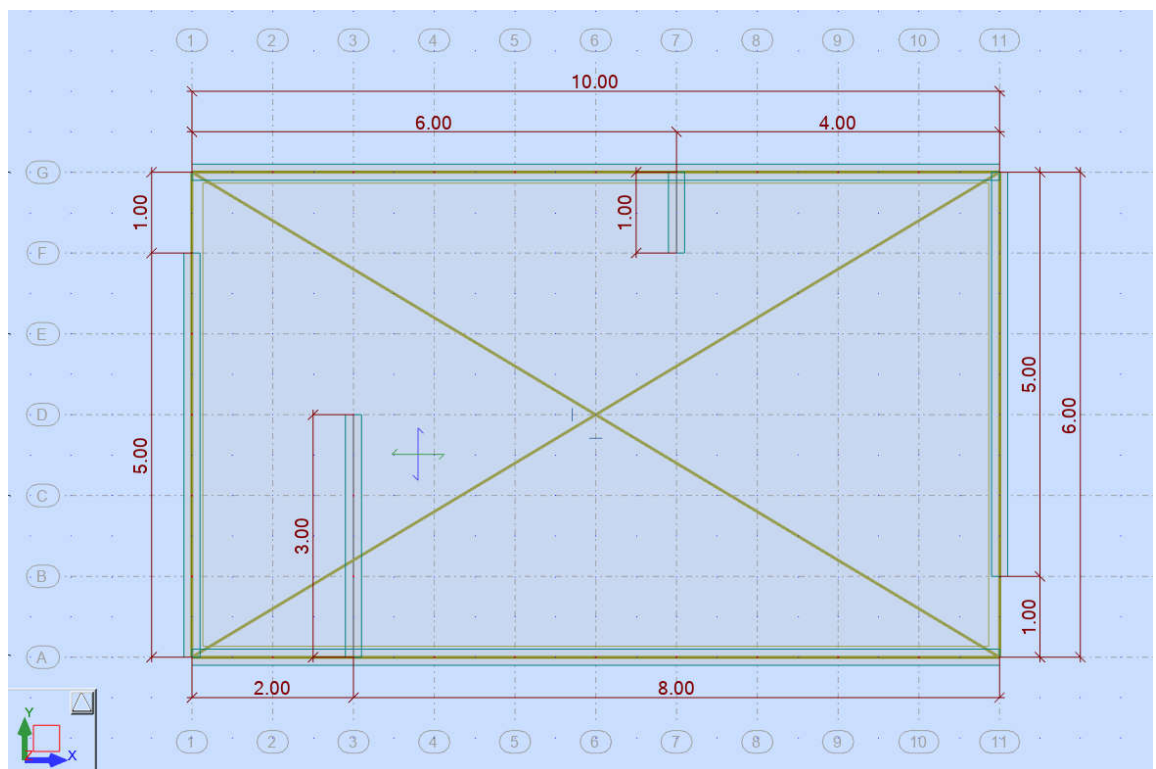
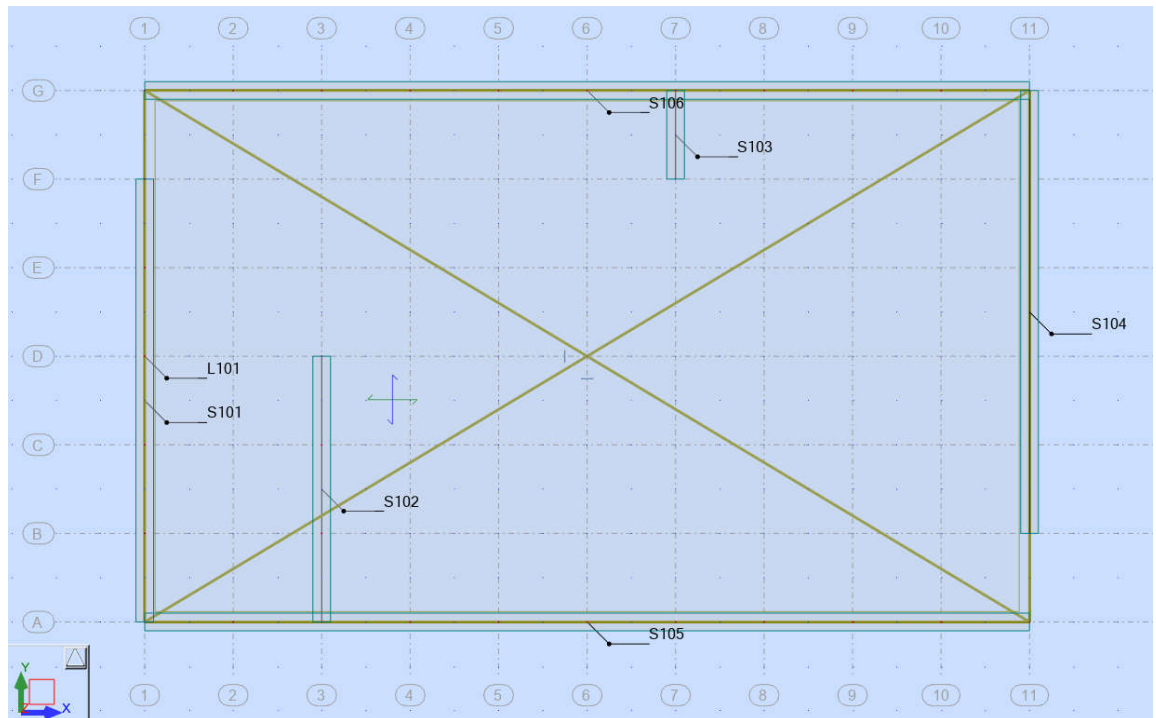
#### Laatasta kiertävä momentti

M 17,27 kNm

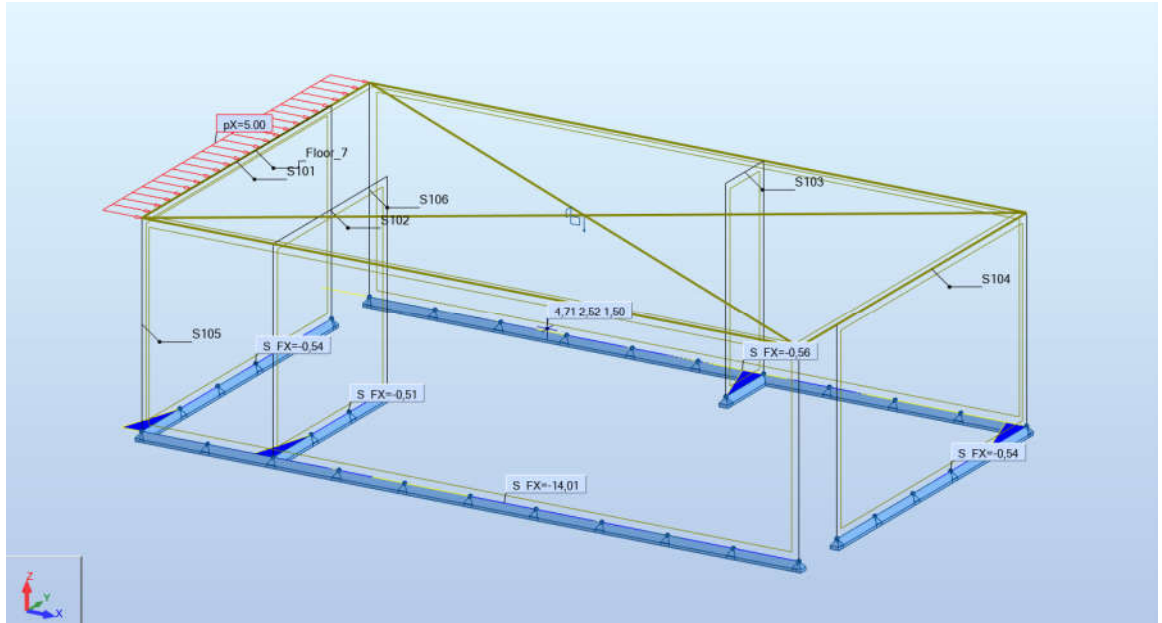
Seinä	$k_y$	x (m)	$k_y \cdot y^2$	$v_y$	$\theta$	Seinän ottama kuorma (kN)
S101	7176	-4,71	159342	0,0038	0,000012	26,56
S102	1550	-2,71	11402	0,0038	0,000012	5,78
S103	57	1,29	95	0,0038	0,000012	0,22
S104	7176	5,29	200643	0,0038	0,000012	27,44
$\Sigma$					$\Sigma$	60,00

Seinä	$k_x$	y (m)	$k_x \cdot y^2$	$v_y$	$\theta$	Seinän ottama kuorma (kN)
S105	57407	-3,00	516667	0,0003	0,000012	15,00
S106	57407	3,00	516667	0,0003	0,000012	15,00
$\Sigma$					$\Sigma$	30,00

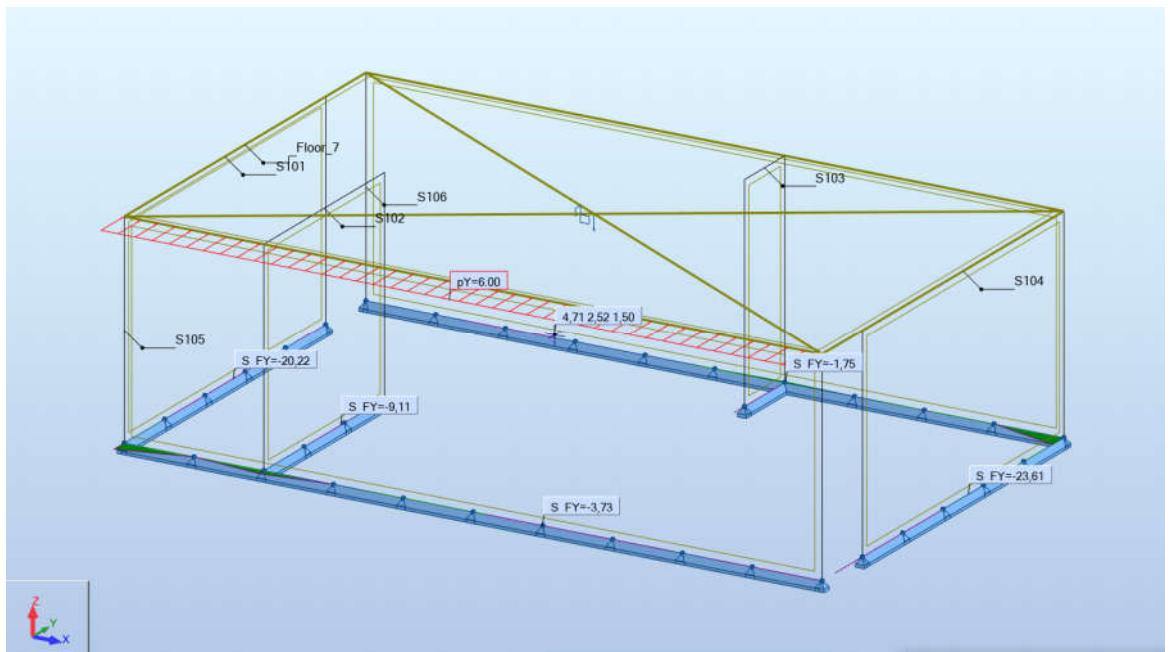
# MALLI 1



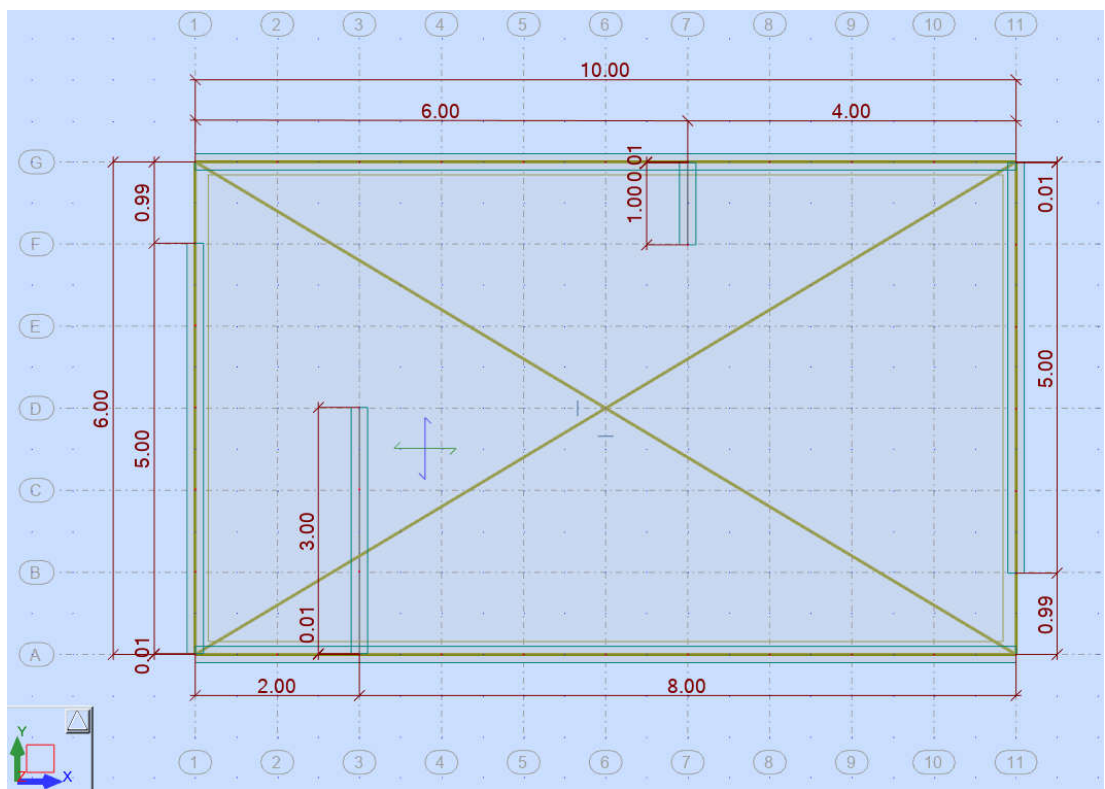
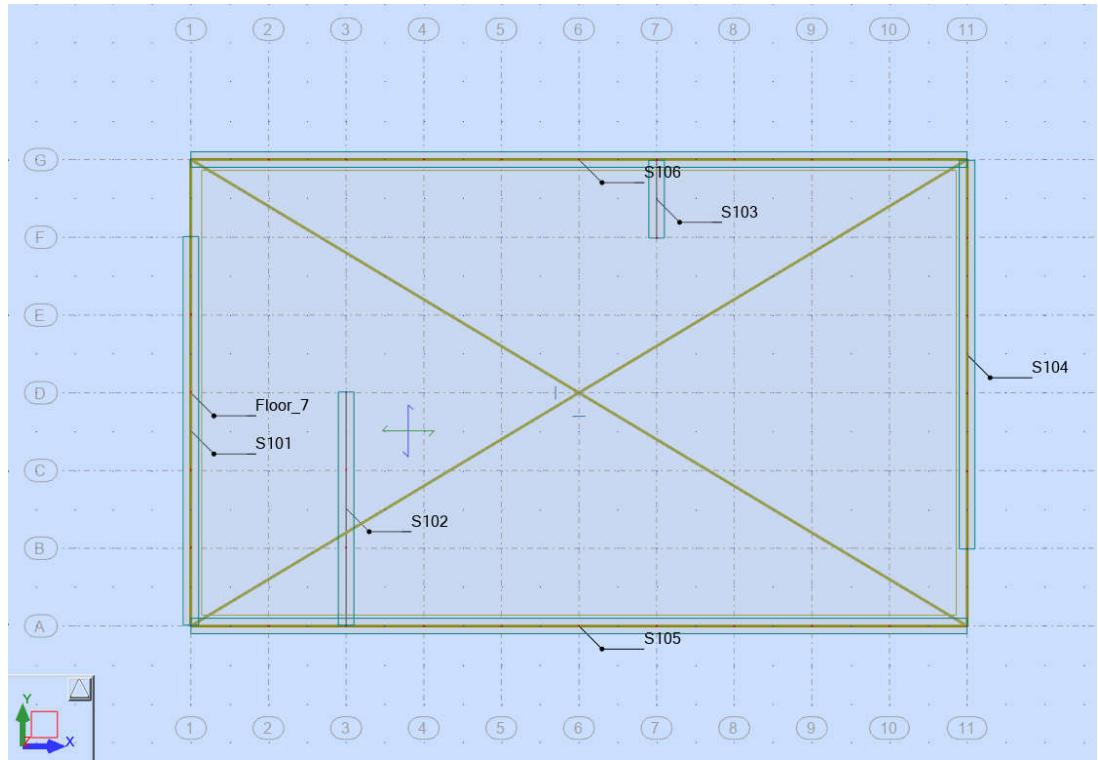
X-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 5 kN/m



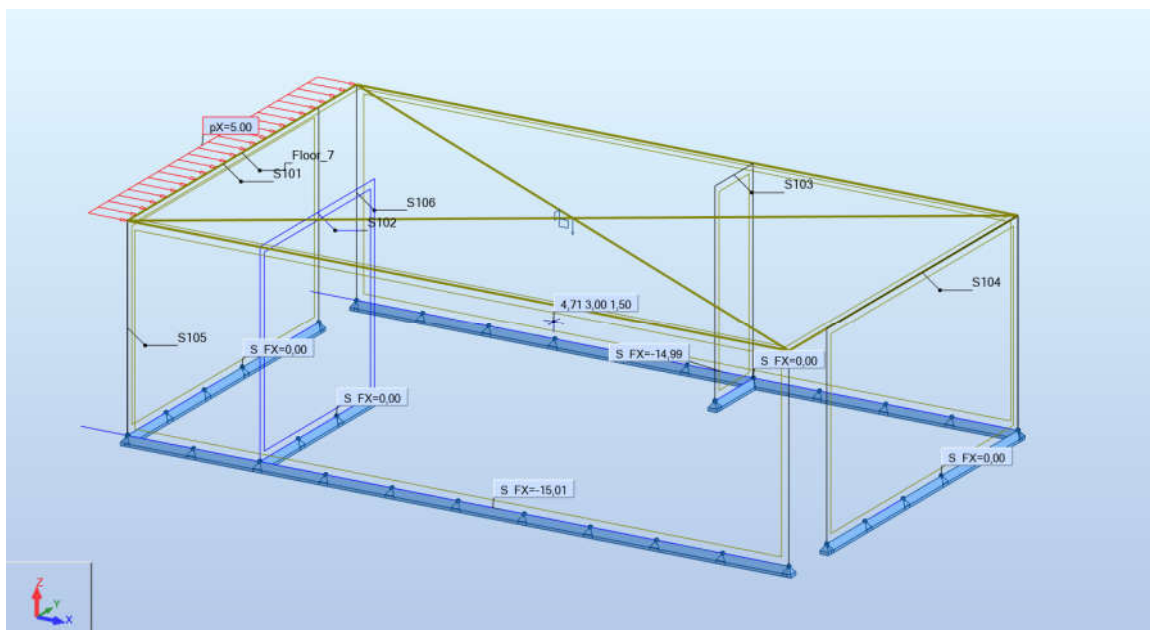
Y-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 6 kN/m



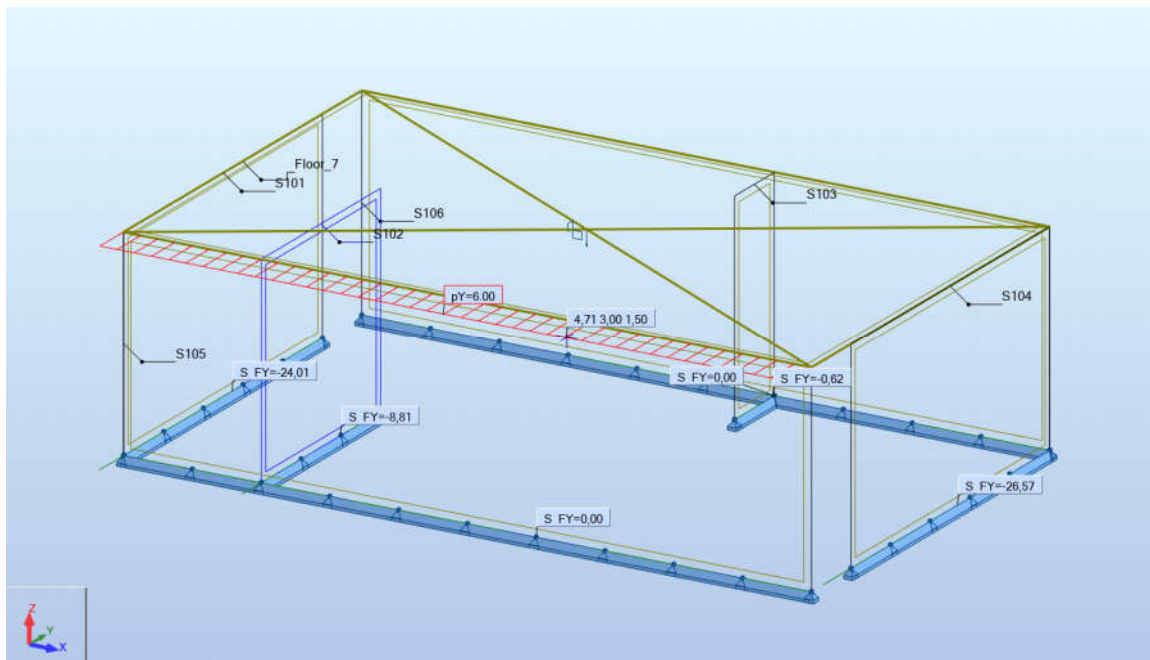
## MALLI 2



# X-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 5 kN/m



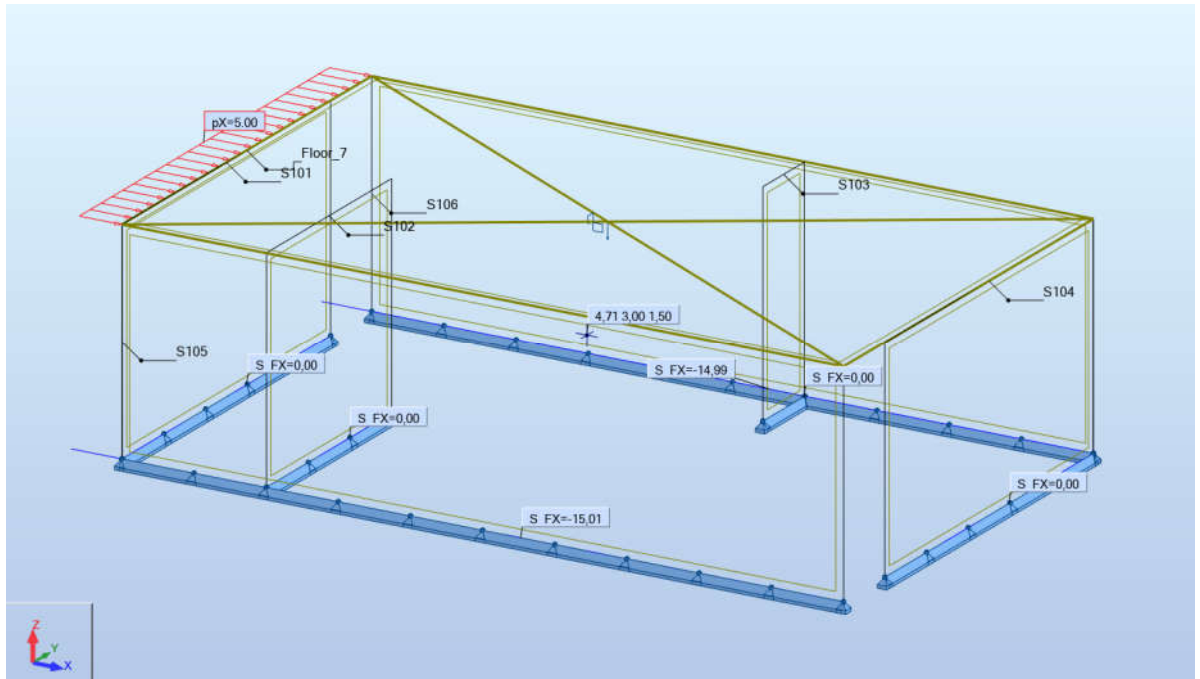
# Y-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 6 kN/m



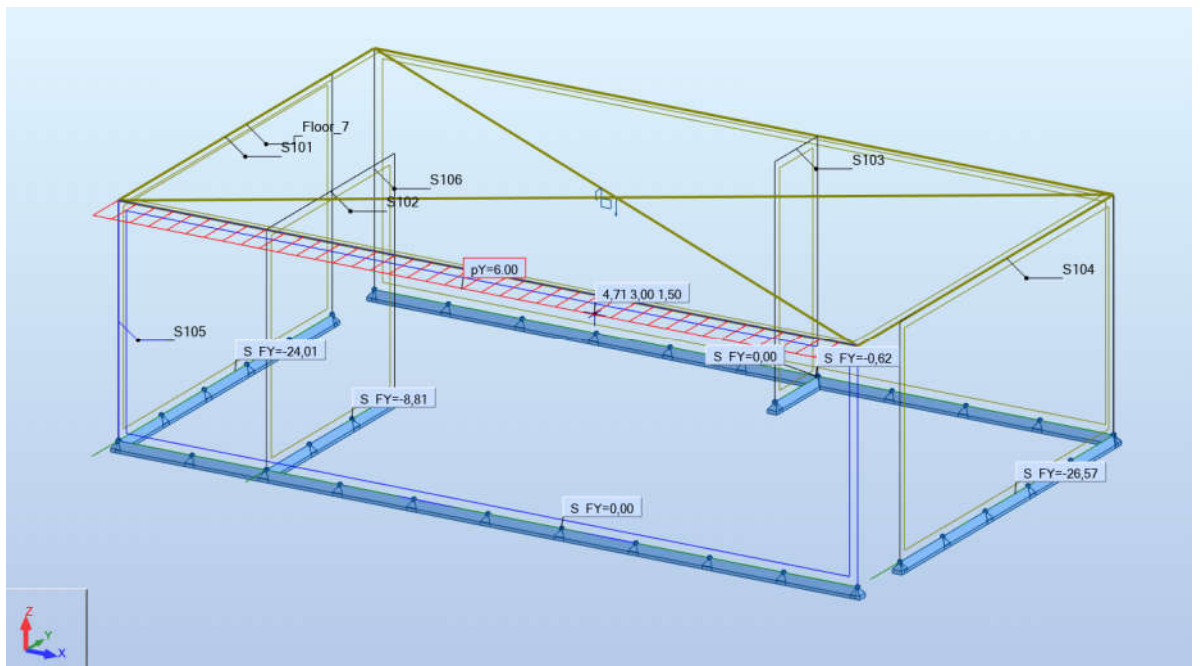




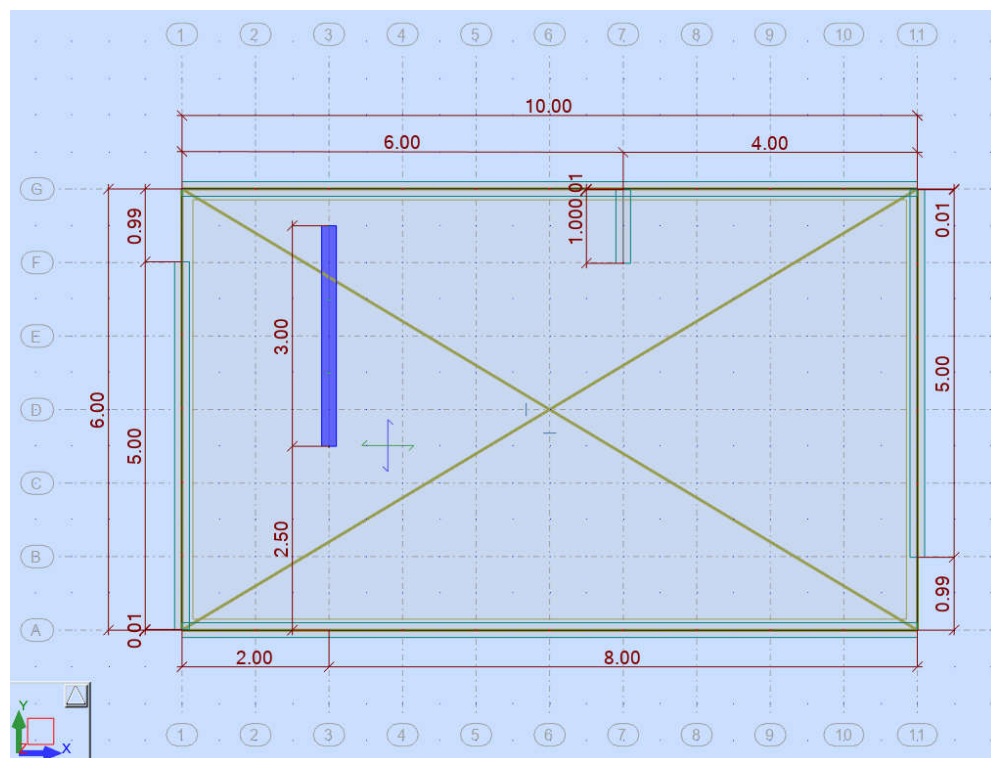
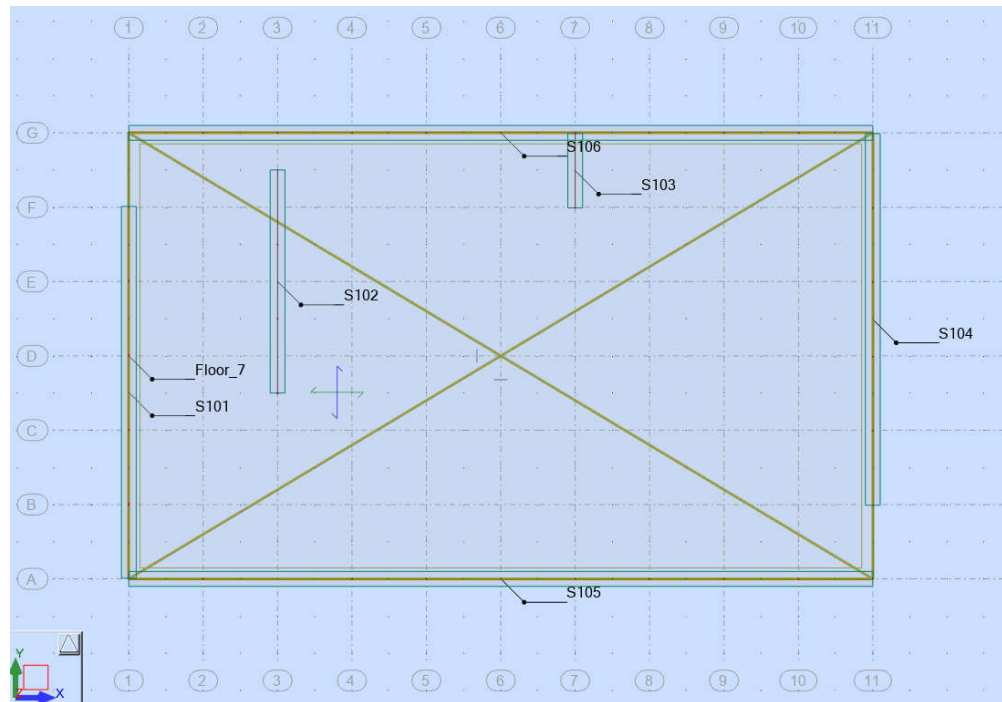
### X-SUUNTAISEN VAAKAKUORMA 5 kN/m



### Y-SUUNTAISEN VAAKAKUORMA 6 kN/m

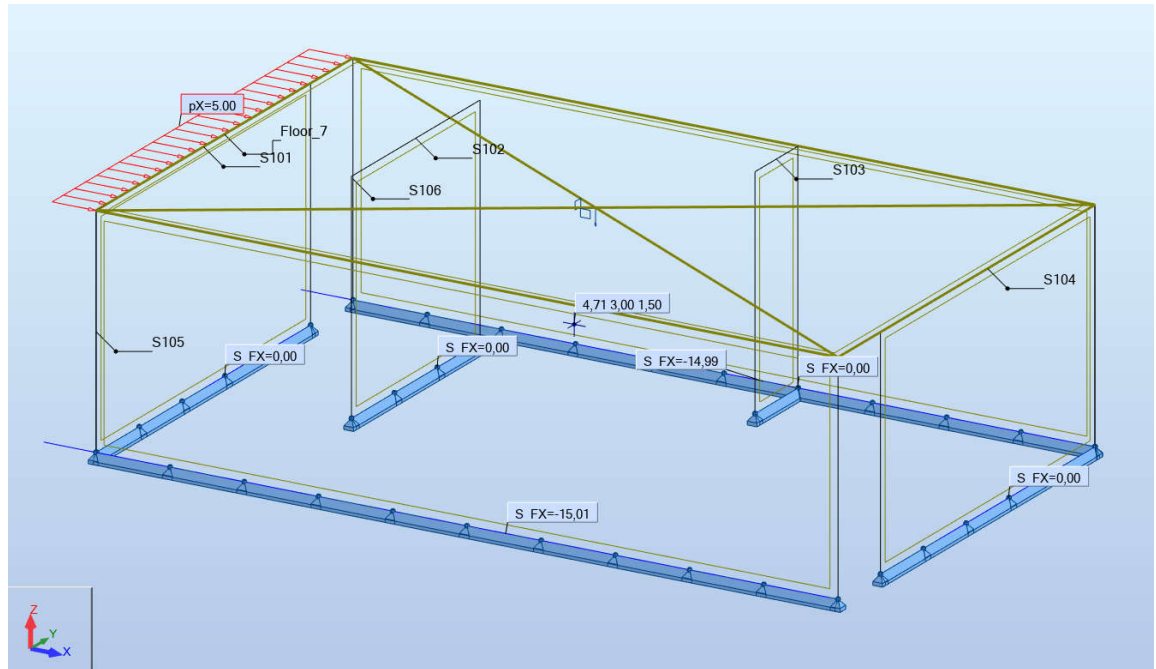


## MALLI 4

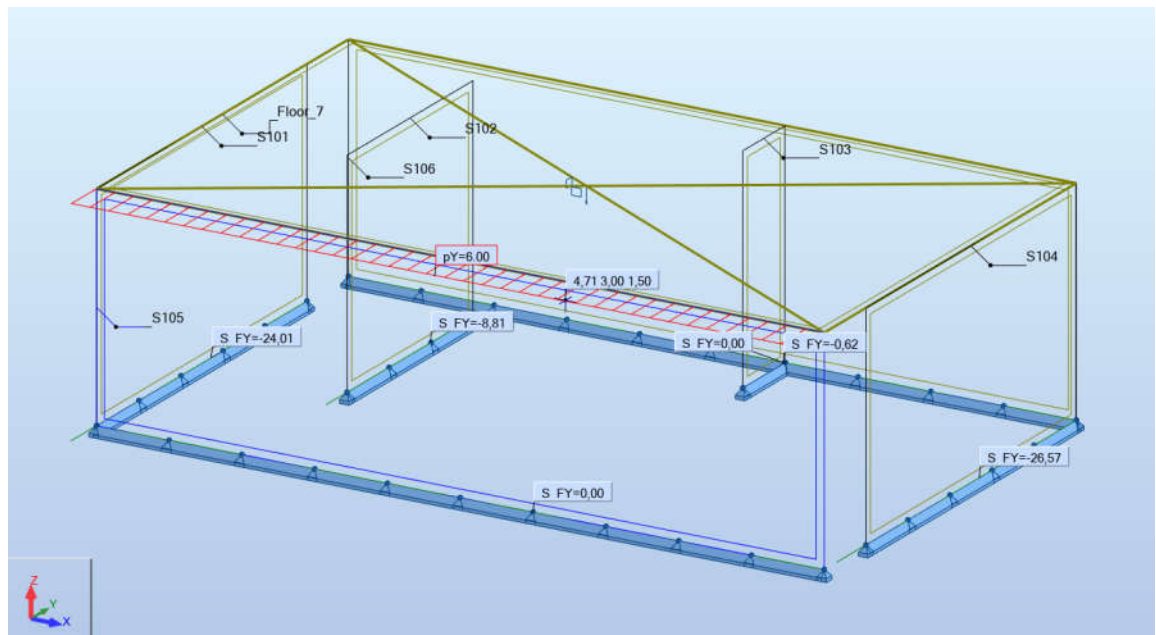




### X-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 5 kN/m



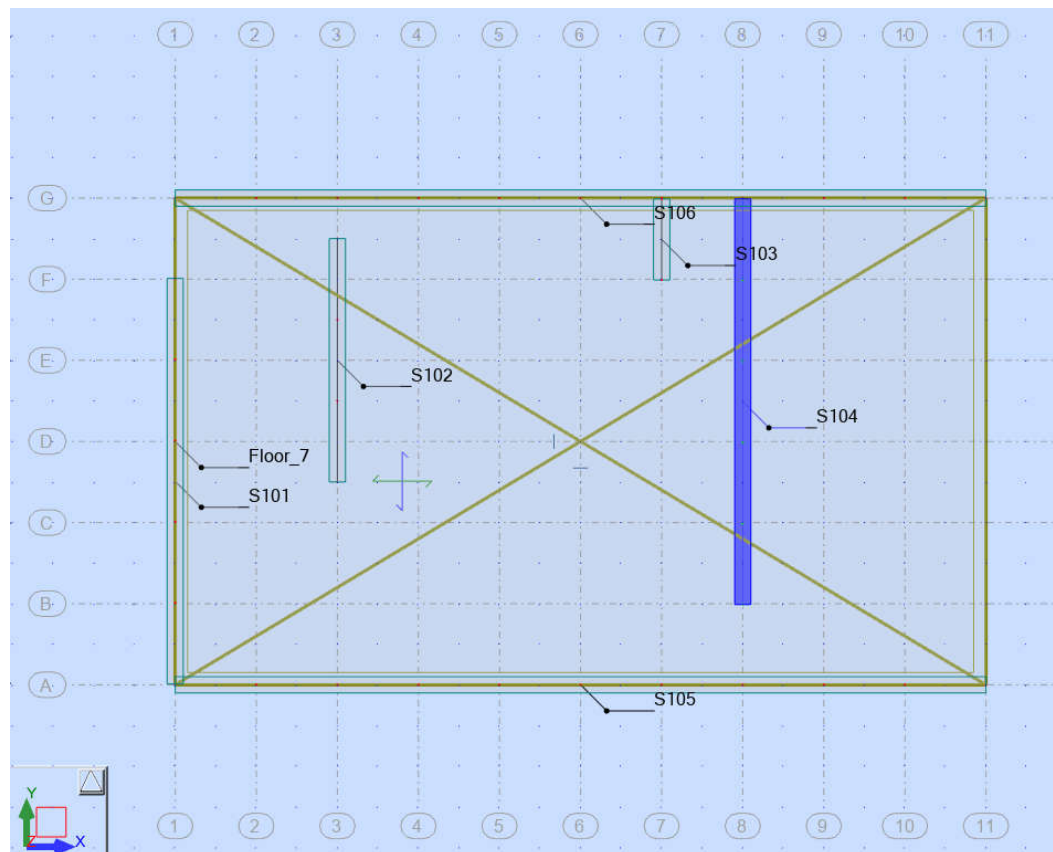
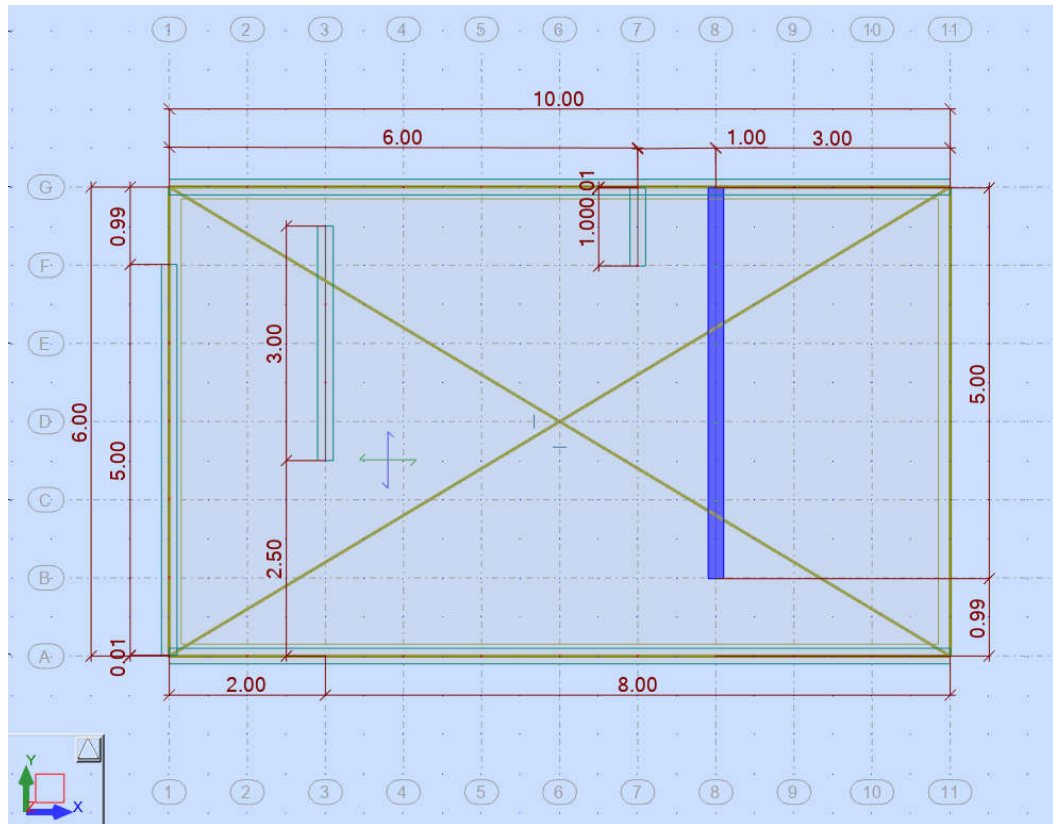
### Y-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 6 kN/m



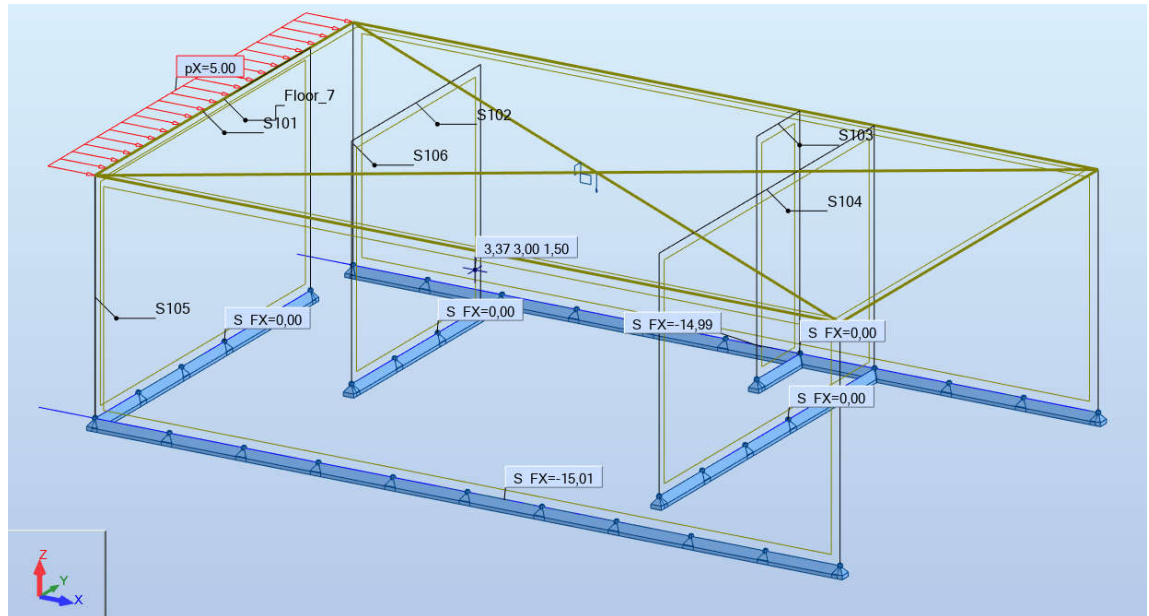
## Esimerkki 2. Malli 5, vaakavoimien jakautuminen jäykistäville seinille.

VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN JÄYKISTÄVILLE SEINILLE						
Rakennus						
b	10	m	Rakennuksen pituus, x-suunta			
d	6	m	Rakennuksen leveys, y-suunta			
Vaakavoimat						
F <sub>x</sub>	30	kN	Vaakavoima, x-suunta			
F <sub>y</sub>	60	kN	Vaakavoima, y-suunta			
E	31000	MPa				
VAAKAVOIMAN JAKAUMA, Y-SUUNTA						
Seinä	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	x' (m)	k <sub>y</sub>	
S101	0,2	5,0	3,0	0,0	7176	
S102	0,2	3,0	3,0	2,0	1550	
S103	0,2	1,0	3,0	6,0	57	
S104	0,2	5,0	3,0	7,0	7176	
				Σ	15959	
VAAKAVOIMAN JAKAUMA, X-SUUNTA						
Seinä	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	y' (m)	k <sub>x</sub>	
S105	0,2	10,0	3,0	0,0	57407	
S106	0,2	10,0	3,0	6,0	57407	
				Σ	114815	
Kiertokeskiö						
$\bar{x}$	3,36	m				
$\bar{y}$	3,00	m				
Vaakavoimat						
F <sub>x</sub>	30,0	kN	b	10,0	m	
F <sub>y</sub>	60,0	kN	d	6,0	m	
Momenttivarsi						
x1	1,637	m				
y1	0,000	m				
Laatasta kiertävä momentti						
M	98,20	kNm				
Seinä	k <sub>y</sub>	x (m)	k <sub>y</sub> *y^2	v <sub>y</sub>	θ	Seinän ottama kuorma (kN)
S101	7176	-3,36	81173	0,0038	0,000081	25,02
S102	1550	-1,36	2881	0,0038	0,000081	5,66
S103	57	2,64	399	0,0038	0,000081	0,23
S104	7176	3,64	94905	0,0038	0,000081	29,09
Σ			179358	Σ		60,00
Seinä	k <sub>x</sub>	y (m)	k <sub>x</sub> *y^2	v <sub>y</sub>	θ	Seinän ottama kuorma (kN)
S105	57407	-3,00	516667	0,0003	0,000081	15,00
S106	57407	3,00	516667	0,0003	0,000081	15,00
Σ			1033333	Σ		30,00

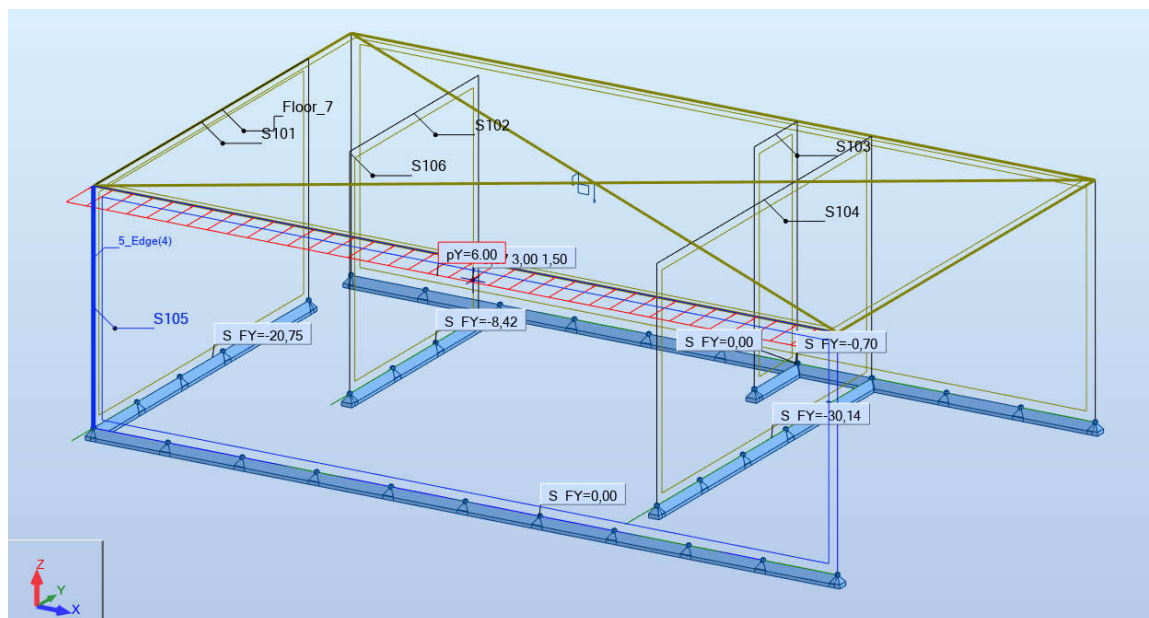
# MALLI 5



### X-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 5 kN/m



### Y-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 6 kN/m

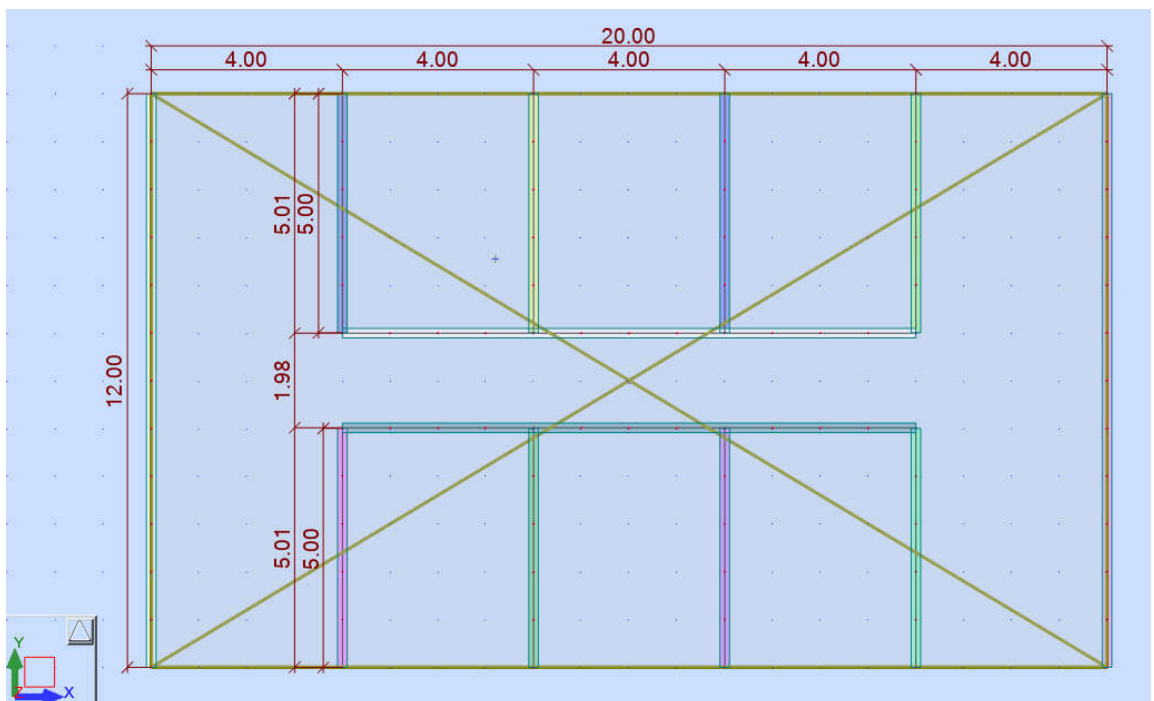
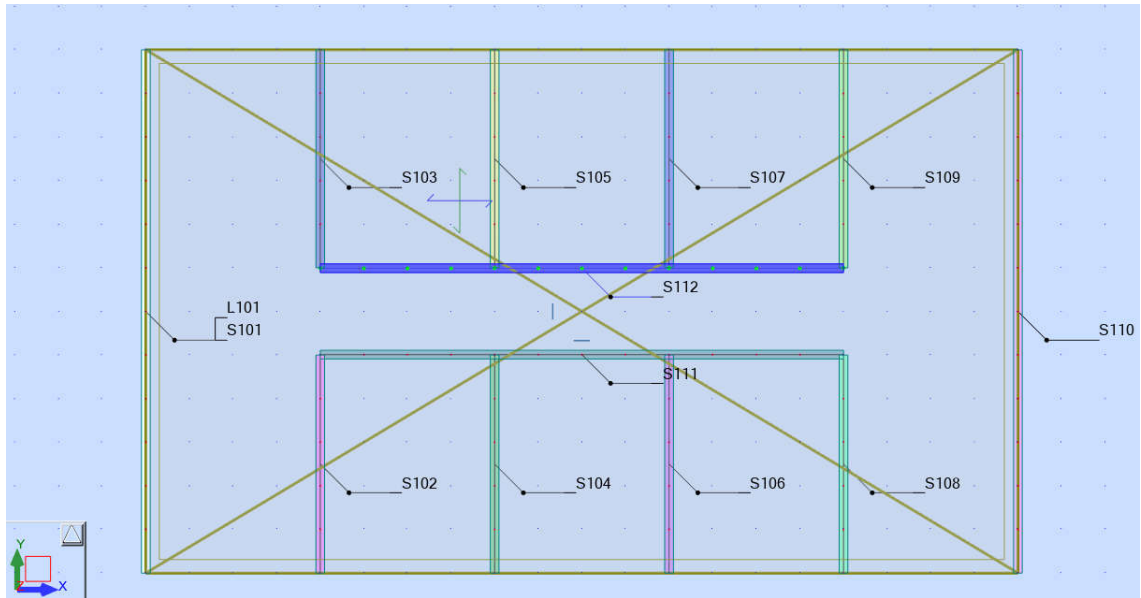


### Esimerkki 3. Malli 7, vaakavoimien jakautuminen jäykistäville seinille.

VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN JÄYKISTÄVILLE SEINILLE						
Rakennus						
b	20 m	Rakennuksen pituus, x-suunta				
d	12 m	Rakennuksen leveys, y-suunta				
Vaakavoimat						
F <sub>x</sub>	60 kN	Vaakavoima, x-suunta				
F <sub>y</sub>	100 kN	Vaakavoima, y-suunta				
E	31000 Mpa					
VAAKAVOIMAN JAKAUMA, Y-SUUNTA						
Seinä	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	x' (m)	k <sub>y</sub>	
S101	0,2	12,0	3,0	0,0	99200	
S102	0,2	5,0	3,0	4,0	7176	
S103	0,2	5,0	3,0	4,0	7176	
S104	0,2	5,0	3,0	8,0	7176	
S105	0,2	5,0	3,0	8,0	7176	
S106	0,2	5,0	3,0	12,0	7176	
S107	0,2	5,0	3,0	12,0	7176	
S108	0,2	5,0	3,0	16,0	7176	
S109	0,2	5,0	3,0	16,0	7176	
S110	0,2	12,0	3,0	20,0	99200	
				Σ	255807	
VAAKAVOIMAN JAKAUMA, X-SUUNTA						
Seinä	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	y' (m)	k <sub>x</sub>	
S105	0,2	15,0	3,0	5,0	193750	
S106	0,2	15,0	3,0	7,0	193750	
				Σ	387500	
Kiertokeskiö						
$\bar{x}$	10,00 m					
$\bar{y}$	6,00 m					
Vaakavoimat						
F <sub>x</sub>	60,0 kN		b	20,0 m		
F <sub>y</sub>	100,0 kN		d	12,0 m		
Momenttivarsi						
x <sub>1</sub>	0,00 m					
y <sub>1</sub>	0,00 m					
Laatasta kiertävä momentti						
M	0,00 kNm					
Seinä	k <sub>y</sub>	x (m)	k <sub>y</sub> *x <sup>2</sup>	v <sub>y</sub>	θ	Seinän ottama kuorma (kN)
S101	99200	-10,00	9920000	0,0004	0,000000	38,779
S102	7176	-6,00	258333	0,0004	0,000000	2,805
S103	7176	-6,00	258333	0,0004	0,000000	2,805
S104	7176	-2,00	28704	0,0004	0,000000	2,805
S105	7176	-2,00	28704	0,0004	0,000000	2,805
S106	7176	2,00	28704	0,0004	0,000000	2,805
S107	7176	2,00	28704	0,0004	0,000000	2,805
S108	7176	6,00	258333	0,0004	0,000000	2,805
S109	7176	6,00	258333	0,0004	0,000000	2,805
S110	99200	10,00	9920000	0,0004	0,000000	38,779
		Σ	20988148		Σ	100,000
Seinä	k <sub>x</sub>	y (m)	k <sub>x</sub> *y <sup>2</sup>	v <sub>y</sub>	θ	Seinän ottama kuorma (kN)
S111	193750	-1,00	193750	0,0002	0,000000	30,000
S112	193750	1,00	193750	0,0002	0,000000	30,000
		Σ	387500		Σ	60,000

VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN JÄYKISTÄVILLE SEINILLE									
TARKISTUS									
Rakennus									
b	20	m	Rakennuksen pituus, x-suunta						
d	12	m	Rakennuksen leveys, y-suunta						
Vaakavoimat			I = jäyhyysmomentti						
F <sub>x</sub>	60	kN	Vaakavoima, x-suunta				x' =painopisteen etäisyys origosta		
F <sub>y</sub>	100	kN	Vaakavoima, y-suunta				e <sub>sc</sub> = kiertokeskiön paikka		
a <sub>n</sub> =resultantin H vaikutusviivan etäisyys keskiöstä									
H = vaakavoimen jakautumiskerroin									
Vaakakuorma	F <sub>y</sub>	100	kN						
Kiertokeskiö R <sub>x</sub>	e <sub>sc</sub>	10,00		e	0,00				
VAAKAVOIMAN JAKAUMA, Y-SUUNTA									
Seinä y-suunt.	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	I (mm4)	x'	a <sub>n</sub>	I <sub>a</sub> <sup>2</sup>	H	Seinän ottama kuorma (kN)
S101	0,2	12,0	3,0	28,800	0,000	-9,999	2879,380	0,388	38,764
S102	0,2	5,0	3,0	2,083	4,000	-5,999	74,973	0,028	2,801
S103	0,2	5,0	3,0	2,083	4,000	-5,999	74,973	0,028	2,801
S104	0,2	5,0	3,0	2,083	8,000	-1,999	8,324	0,028	2,803
S105	0,2	5,0	3,0	2,083	8,000	-1,999	8,324	0,028	2,803
S106	0,2	5,0	3,0	2,083	12,000	2,001	8,342	0,028	2,805
S107	0,2	5,0	3,0	2,083	12,000	2,001	8,342	0,028	2,805
S108	0,2	5,0	3,0	2,083	16,000	6,001	75,027	0,028	2,808
S109	0,2	5,0	3,0	2,083	16,000	6,001	75,027	0,028	2,808
S110	0,2	12,0	3,0	28,800	20,000	10,001	2880,620	0,388	38,774
Seinä x-suunt.									
S111	0,2	15,0	3,0	0,010	5,000	-4,999	0,250	0,000	0,011
S112	0,2	15,0	3,0	0,010	7,000	-2,999	0,090	0,000	0,012
			Σ	74,3	112,0		6093,673		99,996
Vaakakuorma	F <sub>x</sub>	60	kN						
Kiertokeskiö R <sub>y</sub>	e <sub>sc</sub>	6,00		e	0,00				
VAAKAVOIMAN JAKAUMA, X-SUUNTA									
Seinä y-suunt.	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	I (mm4)	y'	a <sub>n</sub>	I <sub>a</sub> <sup>2</sup>	H	Seinän ottama kuorma (kN)
S101	0,2	12,0	3,0	0,008	6,000	0,001	0,000	0,000	0,004
S102	0,2	5,0	3,0	0,003	2,500	-3,499	0,041	0,000	0,002
S103	0,2	5,0	3,0	0,003	7,500	1,501	0,008	0,000	0,002
S104	0,2	5,0	3,0	0,003	2,500	-3,499	0,041	0,000	0,002
S105	0,2	5,0	3,0	0,003	7,500	1,501	0,008	0,000	0,002
S106	0,2	5,0	3,0	0,003	2,500	-3,499	0,041	0,000	0,002
S107	0,2	5,0	3,0	0,003	7,500	1,501	0,008	0,000	0,002
S108	0,2	5,0	3,0	0,003	2,500	-3,499	0,041	0,000	0,002
S109	0,2	5,0	3,0	0,003	7,500	1,501	0,008	0,000	0,002
S110	0,2	12,0	3,0	0,008	6,000	0,001	0,000	0,000	0,004
Seinä x-suunt.									
S111	0,2	15,0	3,0	56,250	5,000	-0,999	56,084	0,499	29,944
S112	0,2	15,0	3,0	56,250	7,000	1,001	56,416	0,501	30,033
			Σ	112,543			112,694		60,000

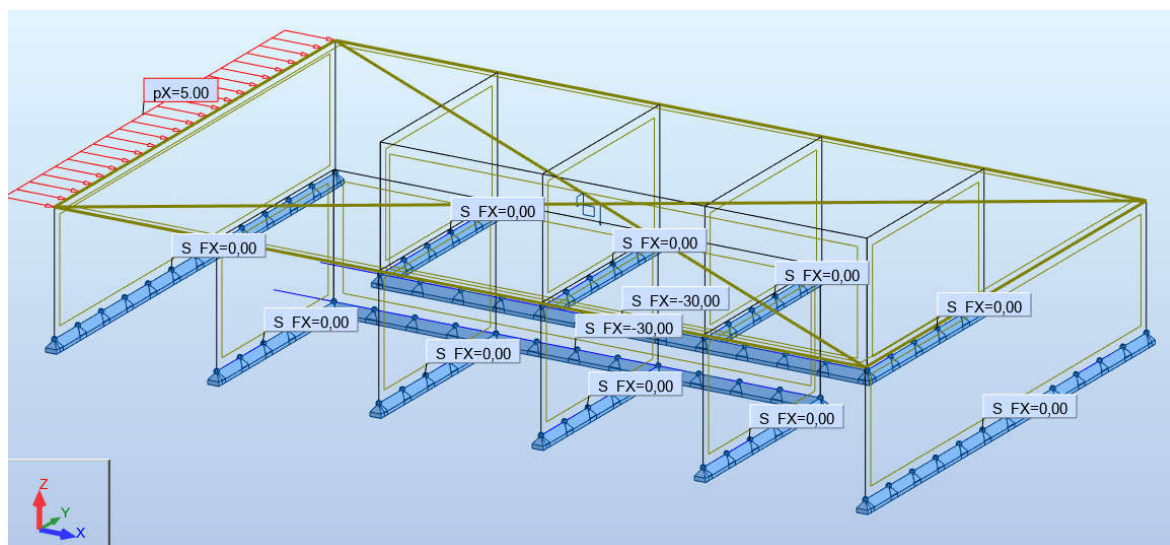
# MALLI 7





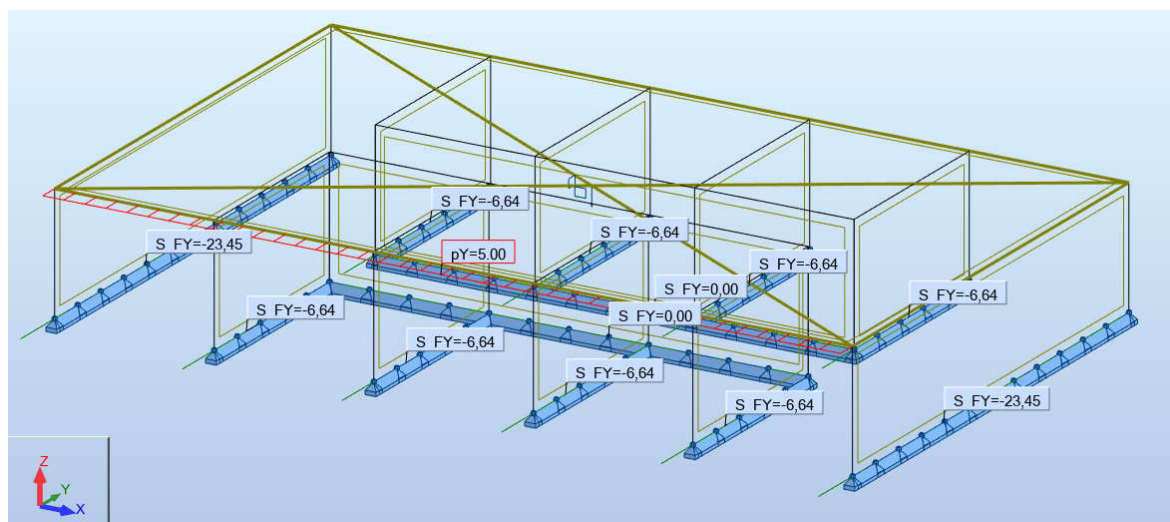
### X-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 5 kN/m

Seinän korkeus 3 m



### Y-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 5 kN/m

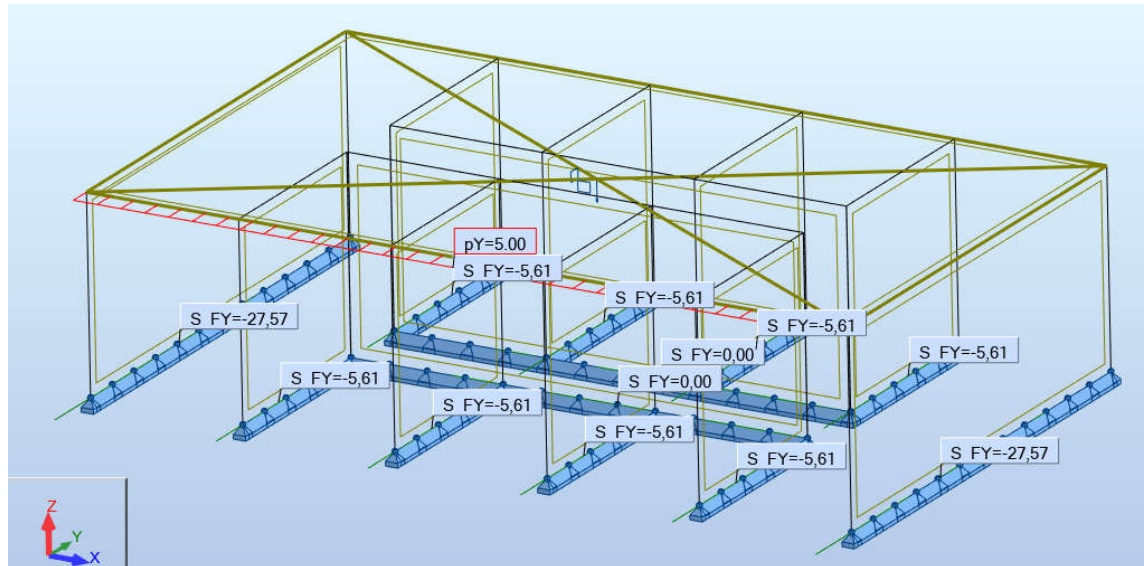
Seinän korkeus 3 m





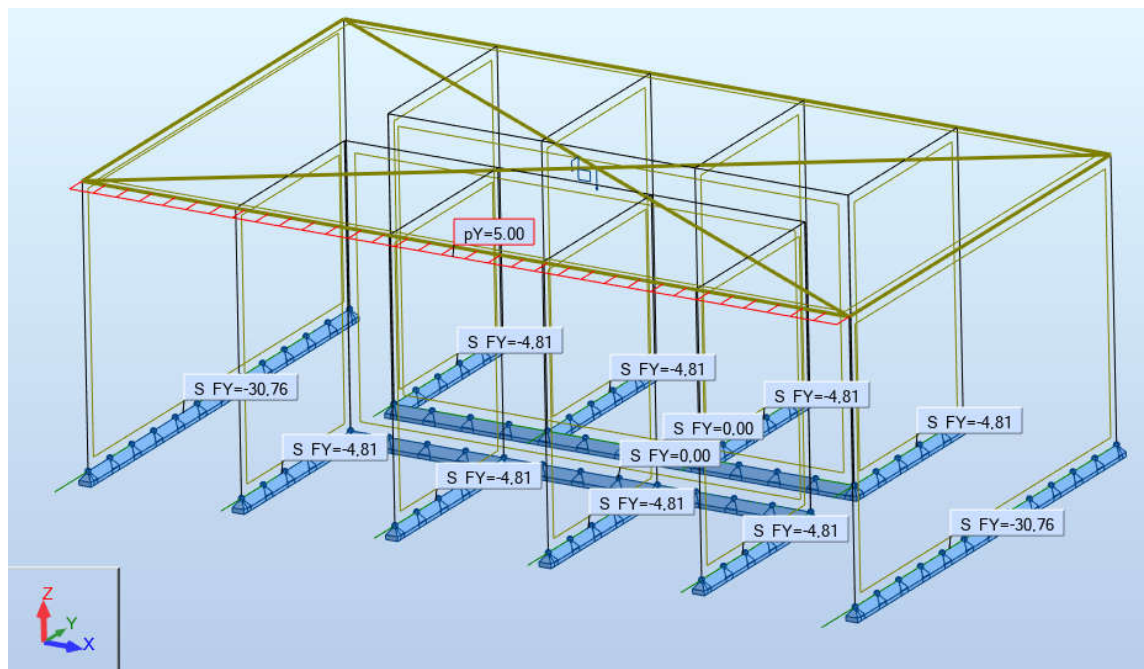
Y-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 5 kN/m

Seinän korkeus 5 m

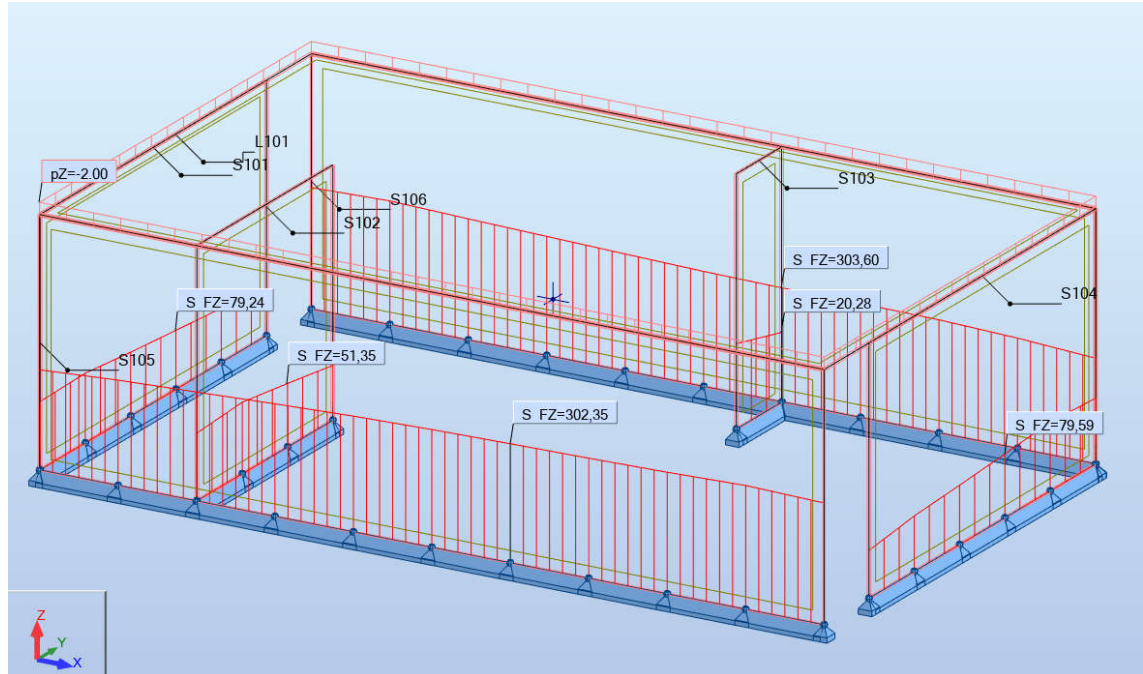


Y-SUUNTAINEN VAAKAKUORMA 5 kN/m

Seinän korkeus 7 m



# Pystykuormat





Palvelutalo Hirvensalmi

1. krs



Kuva: LINJA ARKKITEHDIT



Palvelutalo Hirvensalmi  
2. krs

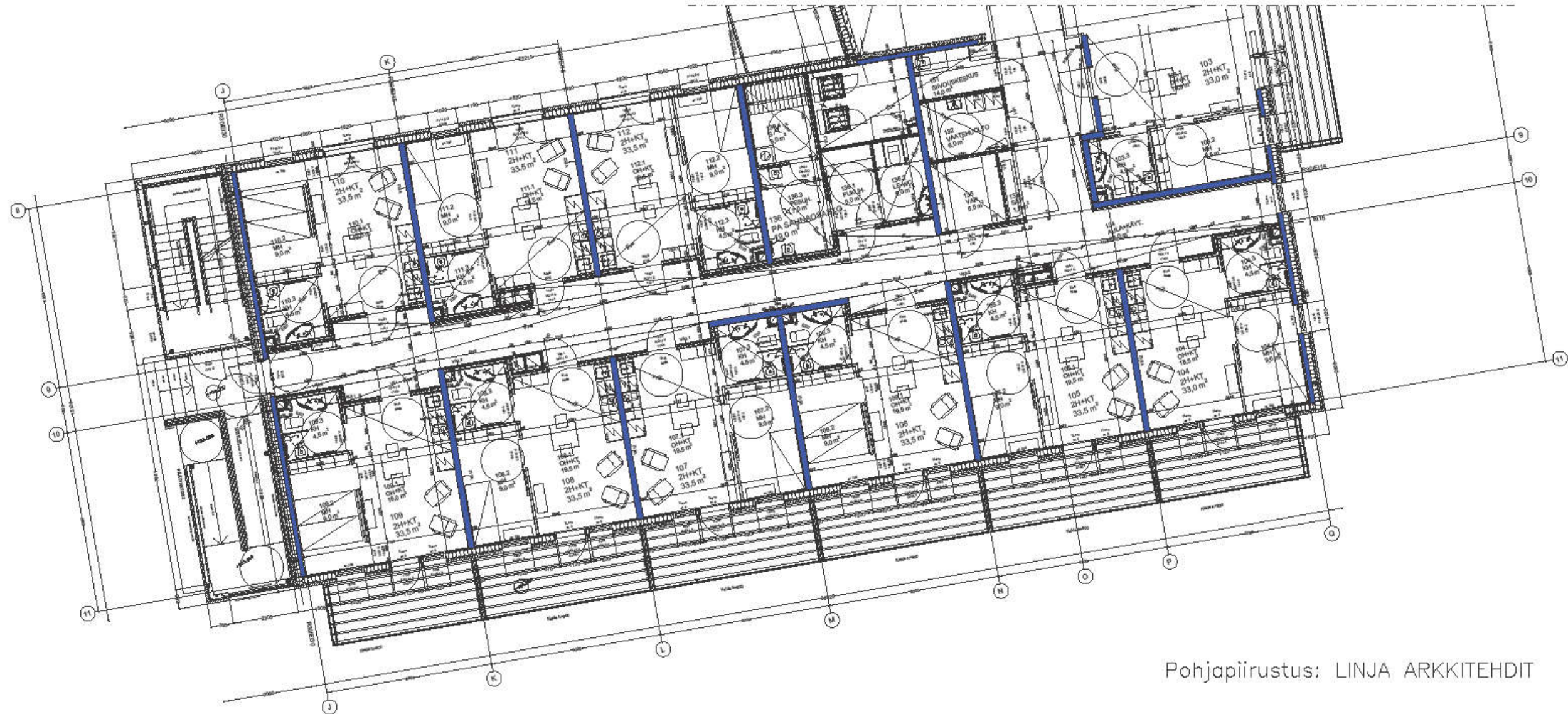


Kuva: LINJA ARKKITEHDIT

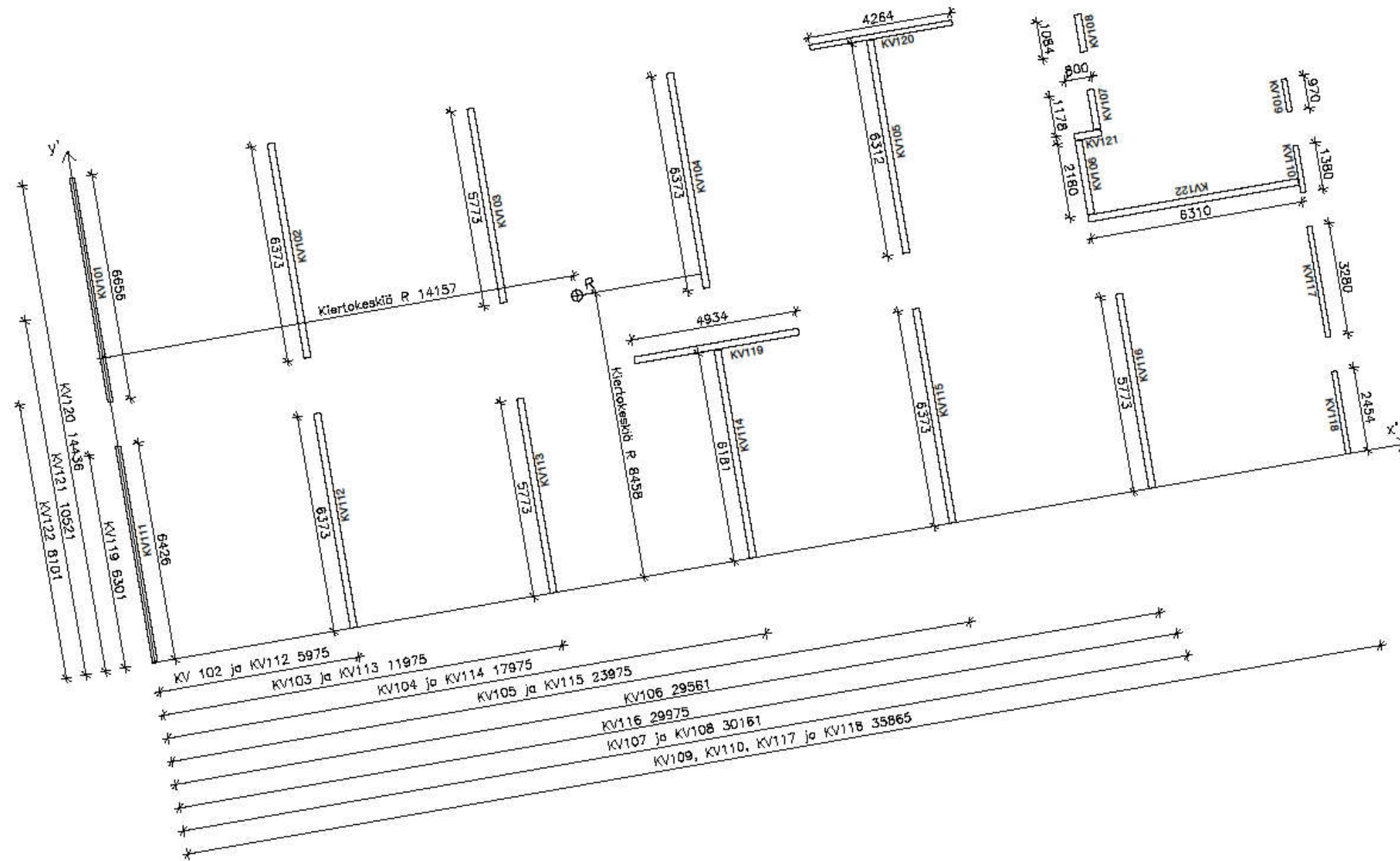


## Jäykistävien seinien sijainti

Lohko C. Jäykistävät seinät merkitty pohjapiirustukseen sinisellä.



## Jäykistävien seinien mitat



Laskelmat

VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN JÄYKISTÄVILLE SEINILLE

Rakennus		
b	35,86 m	Rakennuksen pituus, x-suunta
d	14,40 m	Rakennuksen leveys, y-suunta
Vaakavoimat		
Fx	53,39 kN	Vaakavoima, x-suunta
Fy	109,68 kN	Vaakavoima, y-suunta

VAAKAVOIMAN JAKAUMA, Y-SUUNTA					
Seinä	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	x' (m)	k <sub>y</sub> (MN/m)
KV101	0,15	6,66	3,4	0,000	3,69
KV102	0,20	6,37	3,4	5,975	4,31
KV103	0,20	5,77	3,4	11,975	3,21
KV104	0,20	6,37	3,4	17,975	4,31
KV105	0,20	6,31	3,4	23,975	4,19
KV106	0,20	2,18	3,4	29,561	0,17
KV107	0,20	1,18	3,4	30,161	0,03
KV108	0,20	1,08	3,4	30,161	0,02
KV109	0,15	0,97	3,4	35,865	0,01
KV110	0,15	1,38	3,4	35,865	0,03
KV111	0,15	6,43	3,4	0,000	3,32
KV112	0,20	6,37	3,4	5,975	4,31
KV113	0,20	5,77	3,4	11,975	3,21
KV114	0,20	6,18	3,4	17,975	3,94
KV115	0,20	6,37	3,4	23,975	4,31
KV116	0,20	5,77	3,4	29,975	3,21
KV117	0,15	3,28	3,4	35,865	0,44
KV118	0,15	2,45	3,4	35,865	0,18
Σ					42,90

VAAKAVOIMAN JAKAUMA, X-SUUNTA					
Seinä	Leveys (m)	Pituus (m)	Korkeus (m)	y' (m)	k <sub>x</sub> (MN/m)
KV119	0,20	4,934	3,4	6,301	2,00
KV120	0,15	4,264	3,4	14,436	0,97
KV121	0,20	0,800	3,4	10,521	0,01
KV122	0,20	6,310	3,4	8,101	4,19
Σ					7,17

Kiertokeskiö

$\bar{x}$	14,157 m
$\bar{y}$	8,458 m

Laatastoa kiertävä momentti

Poikittaisvoimat		
Fx	53,39 kN	35,860 Rakennuksen pituus, x-suunta (m)
Fy	109,68 kN	14,400 Rakennuksen leveys, y-suunta (m)

Momenttivarsi

x1	3,773 m
y1	-1,258 m

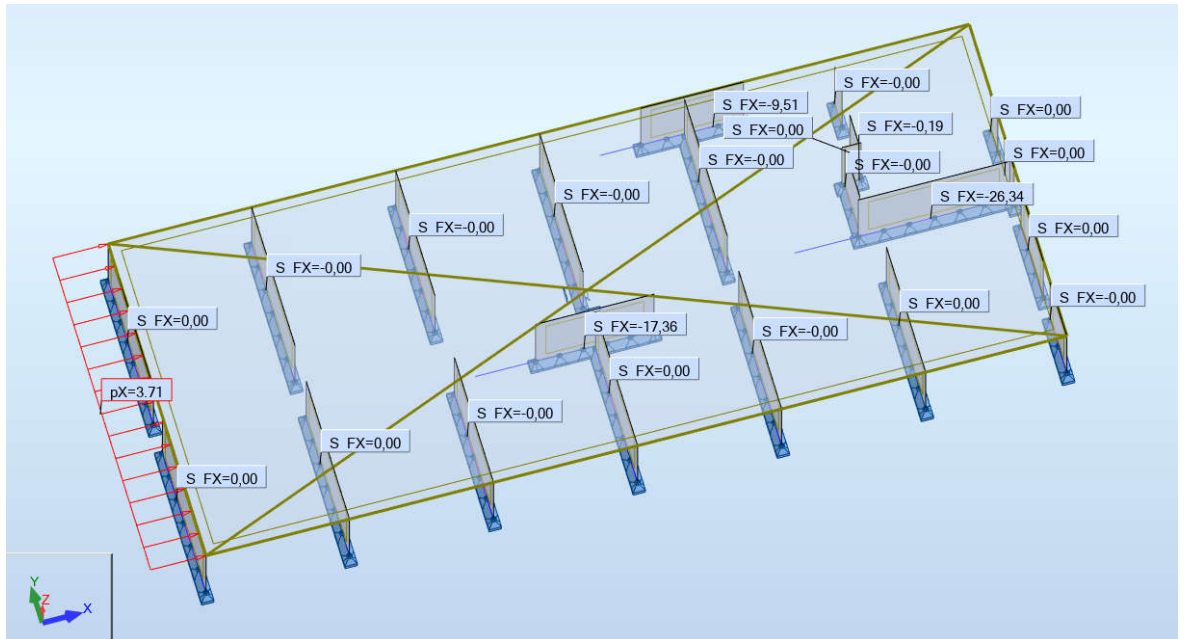
M	481,01 kNm
---	------------

Seinä	k <sub>y</sub> (MN/m)	x (m)	ky*y^2	vy	θ	Seinän ottama kuorma (kN)
KV101	3,7	-14,16	739	2,5567	0,115411	3,40
KV102	4,3	-8,18	289	2,5567	0,115411	6,96
KV103	3,2	-2,18	15	2,5567	0,115411	7,39
KV104	4,3	3,82	63	2,5567	0,115411	12,93
KV105	4,2	9,82	404	2,5567	0,115411	15,47
KV106	0,2	15,40	41	2,5567	0,115411	0,75
KV107	0,0	16,00	7	2,5567	0,115411	0,12
KV108	0,0	16,00	5	2,5567	0,115411	0,09
KV109	0,0	21,71	5	2,5567	0,115411	0,06
KV110	0,0	21,71	15	2,5567	0,115411	0,17
KV111	3,3	-14,16	665	2,5567	0,115411	3,06
KV112	4,3	-8,18	289	2,5567	0,115411	6,96
KV113	3,2	-2,18	15	2,5567	0,115411	7,39
KV114	3,9	3,82	57	2,5567	0,115411	11,80
KV115	4,3	9,82	416	2,5567	0,115411	15,92
KV116	3,2	15,82	802	2,5567	0,115411	14,05
KV117	0,4	21,71	208	2,5567	0,115411	2,23
KV118	0,2	21,71	87	2,5567	0,115411	0,94
Σ			4123			109,68

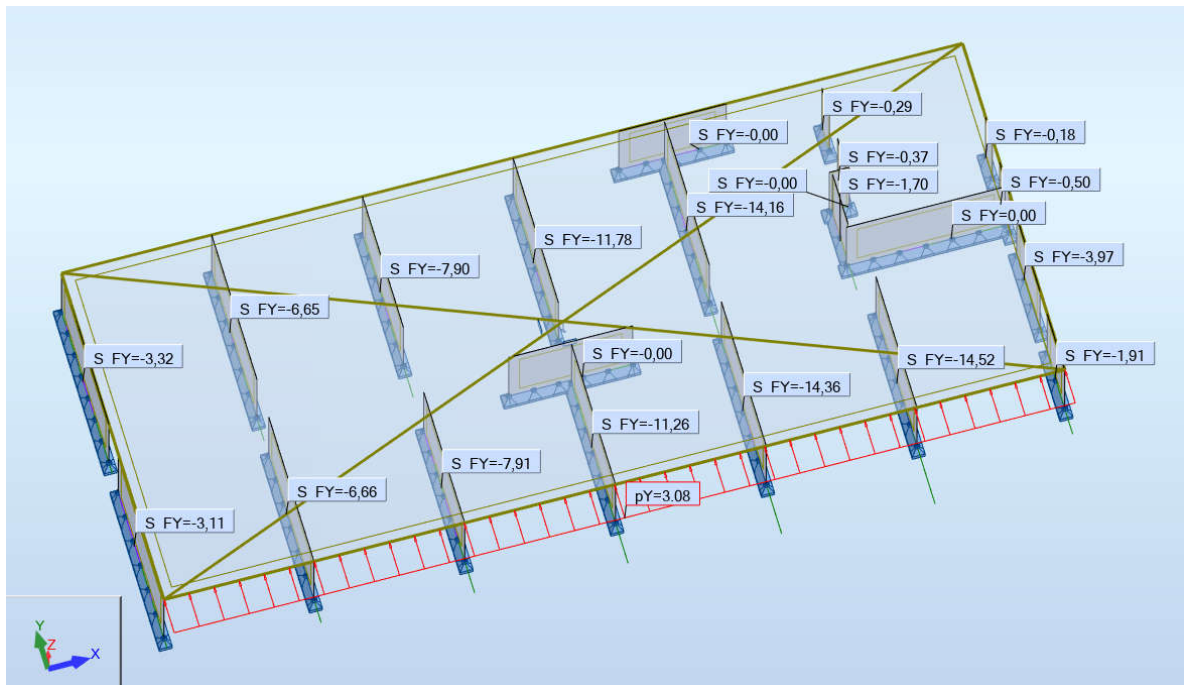
Seinä	k <sub>x</sub> (MN/m)	y (m)	kx*y^2	vx	θ	Seinän ottama kuorma (kN)
KV119	2,0	-2,16	9,311543577	7,4500	0,115411	14,91
KV120	1,0	5,98	34,63525959	7,4500	0,115411	7,22
KV121	0,0	2,06	0,036328514	7,4500	0,115411	0,06
KV122	4,2	0,36	0,532744496	7,4500	0,115411	31,20
Σ			44,51587618			53,39



### X-suuntainen vaakakuorma

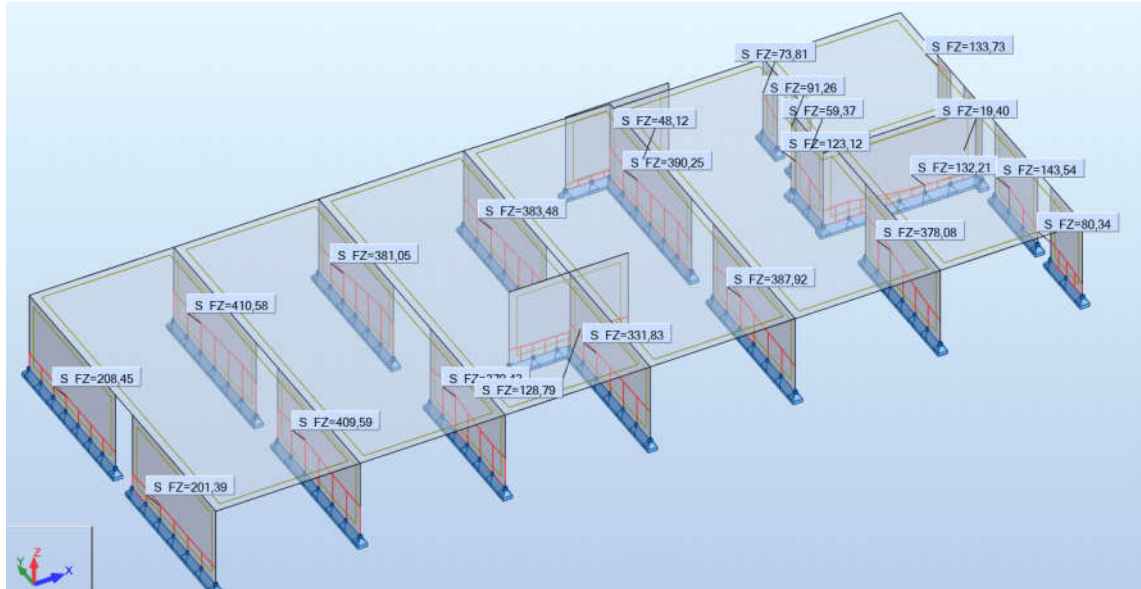


### Y-suuntainen vaakakuorma





## Pystykuormat



**RAKENNUKSEN KOKONAISTUULIKUORMA****LÄHTÖTIEDOT**

Paikkakunta	Hirvensalmi
Maastoluokka	III
Rakennuksen korkeus	$h := 11.141 \text{ m}$
Rakennuksen pitkä sivu	$d := 49.392 \text{ m}$
Rakennuksen lyhyt sivu	$b := 44.522 \text{ m}$

**VOIMAKERROINMENETELMÄ:**

Tuuli kohtisuoraan talon lyhyempää sivua vasten:

Rakennekerroin	$c_s c_d := 1$
Hoikkuusluku	$\lambda := 2 \cdot \frac{h}{b} = 0.5$
Sivumittojen suhde	$\frac{d}{b} = 1.109$
voimakerroin	$c_f := 1.25$
Nopeuspaine	$q_{p0} := 0.49 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
-> tasainen maasto	$q_p := q_{p0} = 0.49 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
Tuulikuorman vaikutusala	$A_{ref} := b \cdot h = 496.02 \text{ m}^2$
Kokonaisvoima	$F_w := c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p \cdot A_{ref} = 304 \text{ kN}$
Pintakuormana	$q_{w,k} := c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p = 0.613 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Tuuli kohtisuoraan talon pidempää sivua vasten:

Rakennekerroin  $c_s c_d := 1$

Hoikkuusluku  $\lambda := 2 \cdot \frac{h}{d} = 0.45$

Sivumittojen suhde  $\frac{b}{d} = 0.901$

voimakerroin  $c_f := 1.34$

Nopeuspaine  $q_{p0} := 0.49 \frac{kN}{m^2}$

-> tasainen maasto  $q_p := q_{p0} = 0.49 \frac{kN}{m^2}$

Tuulikuorman vaikutusala  $A_{ref} := d \cdot h = 550.276 \text{ m}^2$

Kokonaisvoima  $F_w := c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p \cdot A_{ref} = 361 \text{ kN}$

Pintakuormana  $q_{w,k} := c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p = 0.657 \frac{kN}{m^2}$

**LISÄVAAKAVOIMAT****1 KRS JÄYKISTÄVÄT SEINÄT**

$$\text{Ontelolaatat } hl=265 \quad g_{k,1} := 3.8 \frac{kN}{m^2}$$

$$\text{Plaano } hl=50 \quad g_{k,2} := 1.1 \frac{kN}{m^2}$$

$$2 \text{ krs väliseinät} \quad g_{k,3} := 1.2 \frac{kN}{m}$$

$$\text{Hyötykuorma, luokka A} \quad q_{k,1} := 2.0 \frac{kN}{m^2}$$

$$\text{Rakennuksen leveys} \quad b := 15.1 \text{ m}$$

$$\text{Rakennuksen pituus} \quad l := 36.6 \text{ m}$$

$$\text{Välipohjan pinta-ala, ontelolaatat} \quad A_3 := 512.2 \text{ m}^2$$

$$2. \text{ krs väliseinät} \quad L_{w,3} := 175.0 \text{ m}$$

$$P_{Ed,3} := 1.15 \cdot (A_3 \cdot (g_{k,1} + g_{k,2}) + L_{w,3} \cdot g_{k,3}) + 1.5 \cdot A_3 \cdot q_{k,1} = 4664 \text{ kN}$$

Lisävaakavoimat lyhyemmässä suunnassa

$$H_{dt,3} := \frac{P_{Ed,3}}{150} = 31.096 \text{ kN}$$

Lisävaakavoima pidemmässä suunnassa

$$H_{dl} := \frac{b}{l} \cdot \frac{P_{Ed,3}}{150} = 12.829 \text{ kN} \quad \parallel \leq \parallel \quad \frac{P_{Ed,3}}{250} = 18.657 \text{ kN}$$

$$H_{dl,3} := 18.657 \text{ kN}$$